LA TEORÍA ONDULATORIA DE LA LUZ

HUYGENS

Un rayo atrapado en una onda



NATIONAL GEOGRAPHIC

CHRISTIAAN HUYGENS fue uno de los científicos que guió a la ciencia moderna en sus primeros pasos. El físico y matemático holandés se vio arropado con el manto de una educación exquisita que le permitió introducirse en los círculos intelectuales del siglo XVII, en una época en la que las sociedades culturales y el intercambio de ideas comenzaban a emerger. Pionero en el estudio matemático de la probabilidad, sus trabajos en el campo de la mecánica le condujeron al desarrollo del reloj de péndulo. Pero fueron sus platos fuertes la óptica y el estudio de la naturaleza de la luz, que le permitieron establecer el principio de Huygens, esto es, la base de la teoría ondulatoria de la luz desarrollada posteriormente. También introdujo mejoras sustanciales en el telescopio que le llevaron a descubrir Titán, el mayor satélite de Saturno, así como reconocer sus anillos.

LA TEORÍA ONDULATORIA DE LA LUZ

HUYGENS

Un rayo atrapado en una onda

NATIONAL GEOGRAPHIC

DAVID BLANCO LASERNA es físico y escritor. Ha publicado numerosos libros de divulgación científica entre los que destacan sendas biografías de Vito Volterra y de Emmy Noether.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Aci: 93ad; Age Fotostock: 57; Francesco Apollodoro: 112; Archivo RBA: 21, 37, 53, 58, 59, 63, 67ai, 67c, 69, 76, 149bi, 149bd; Henry Baker: 125; Biblioteca André Desguine: 25bd; Bridgeman Art Library: 149ad; Jacob Coning: 114; Adriaen Hanneman/Mauritshuis: 25ai; Huygensmuseum Hofwyck, Voorburg: 25ad; Sir Godfrey Kneller/National Portrait Gallery: 93ai; NASA/JPL: 46; Caspar Netscher: 149ai; Smithsonian Institution Libraries: 67b; Leendert Springer: 25bi; Henri Testelin/Palacio de Versalles: 93b; Universidad de York (Departamento de Matemáticas): 67ad; Franz Wulfhagen: 43.

ISBN: 978-84-473-7680-3
Depósito legal: B-13295-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Si cada nación tiene derecho a su edad de oro, entonces el siglo XVII pagó esa deuda con creces a Holanda. En su modesta superficie, abreviada por el mar, los ríos y los lagos, se concentró en aquella época una plétora de mentes excepcionales que parecía desafiar la estadística. Destacaron en todas las artes y oficios, desde la pintura hasta la milicia, pasando por el comercio, el derecho, la navegación, la ingeniería, la literatura o la ciencia. La mayoría compartía una curiosidad heterogénea, que tendía puentes entre unas actividades y otras, como si se sintieran comprometidos en una formidable empresa colectiva.

El filósofo Baruch Spinoza pulía lentes para telescopios y microscopios. Se especula que uno de los pioneros en el campo de la microscopía, Antoni van Leeuwenhoek, sirvió de modelo a Johannes Vermeer en *El astrónomo* y *El geógrafo* y que, además, le mostró las posibilidades pictóricas de la cámara oscura. El ingeniero Simon Stevin escribía sobre política y el político Johan de Witt era un matemático avezado. Todos ellos prosperaron al amparo de la tolerancia religiosa, que extendió su manto protector a extranjeros ilustres, como René Descartes, y a un amplio registro de autores, que sufrían la censura en sus respectivos países. Casi una cuarta parte de los libros publicados en Europa procedía de prensas holandesas.

A pesar de que durante este período de esplendor el mundo tuvo la impresión de girar en torno a Ámsterdam, La Haya o Delft,

Christiaan Huygens vivió muchos años al otro lado de sus fronteras, sobre todo en París. Desde muy pequeño fue adiestrado para desenvolverse en el gran escenario del mundo. Acabó eclipsando a su padre, aunque se trataba de una estrella difícil de tapar. Constantijn Huygens encarnó como nadie al cortesano soñado por Baltasar Castiglione. Fue políglota, músico y literato por vocación y un diplomático consagrado a la casa de Orange por compromiso y porque de algún modo tenía que ganarse la vida. Su espíritu inquieto no distinguía entre una cultura científica y otra humanística. En su biblioteca de La Haya acumuló cerca de 3000 libros, de los cuales una décima parte eran de física y matemáticas. La educación pluridisciplinar que recibió promovió la curiosidad omnívora de su vida adulta, que supo transmitir a su hijo Christiaan. También le facilitó una privilegiada red de contactos. En la edición de las obras completas de Christiaan Huygens casi la mitad de los volúmenes se ocupa de su correspondencia. Desde luego, su perfil no corresponde al del sabio huraño que acrisola su obra en soledad. Con sus remitentes se podría elaborar el quién es quién de la ciencia de la época. Huygens discutió sus ideas con Isaac Newton, Gottfried Leibniz, Robert Boyle, Marin Mersenne, el marqués de L'Hôpital, Robert Hooke o Antoni van Leeuwenhoek. Este entramado de vínculos personales, unido al progreso de las comunicaciones y a la fundación de las primeras revistas e instituciones científicas, como la Royal Society o la Académie Royale des Sciences —que dirigió—, le mantuvo al corriente de los últimos descubrimientos.

La batalla decisiva de la revolución científica se libró en los cielos, con el telescopio como natural aliado. Huygens se ganó sus primeros galones en el frente abierto por Galileo, al resolver uno de los problemas que habían suscitado sus observaciones de Saturno. En las representaciones más simples de una noche estrellada aparecen tres símbolos recurrentes: los círculos, que hacen las veces de satélites o planetas; los polígonos de varias puntas, para las estrellas, y los círculos rodeados por un anillo. Esta última figura es la más moderna y no se incorporó al imaginario astronómico hasta que Huygens la introdujo en 1656. Las lentes de su telescopio no prestaban la suficiente resolución para distin-

guir el anillo de Saturno, así que su mérito fue vislumbrarlo con los ojos de una inteligencia bien informada. También localizó la primera luna del planeta, Titán, y supo establecer con asombrosa exactitud la escala del sistema solar.

Estos descubrimientos sirvieron de remate a una exhaustiva investigación teórica. Huygens escudriñó los cielos con sus propios telescopios, pero antes de sentarse a fabricarlos se molestó en fundar las leyes de la óptica geométrica, que gobiernan las trayectorias de la luz al cruzar cualquier juego de lentes. Supo así cómo explotar al máximo las posibilidades del instrumento. Ideó lentes compuestas que corregían la aberración esférica y micrómetros que convirtieron el telescopio en una herramienta de precisión.

A partir de la década de 1670 se dio cuenta de que su conocimiento de la luz, en apariencia profundo, era meramente descriptivo y pasó a interrogarse acerca de su naturaleza. Este cambio de actitud dio aliento a una ambiciosa teoría, que se considera el germen del modelo ondulatorio de la luz y que abrió la vía a las visiones más complejas de Fresnel, Young y Maxwell. Para Huygens la luz era una onda en el sentido de que se propaga en círculos —en realidad esferas— crecientes. La agitación de las partículas luminosas se transmite hasta el ojo del observador mediante una larga cadena de colisiones entre partículas de materia. El llamado «principio de Huygens» constituye un refinado ejemplo de matematización de los fenómenos y ofreció un soporte conceptual al enigmático comportamiento del espato de Islandia. Esta variedad transparente de calcita, descubierta en una cantera de Helgustadir, presenta doble refracción: los rayos luminosos se dividen en dos al atravesarlo.

Aunque Saturno y la luz le ganaron una reputación perdurable, la invención de la que él se sentía más orgulloso era el reloj de péndulo, que ya había entrevisto Galileo sin acertar a plasmarlo en un mecanismo fiable. Huygens atacó el problema desde todos los ángulos imaginables y su estudio, más que una obra de mecánica, derivó en un taller de innovación física y matemática.

Con frecuencia Huygens ha sido tachado de «cartesiano», una caracterización que no le habría hecho demasiado feliz. De

elegir él los padrinos, seguramente hubiera preferido a Galileo o Arquímedes. Descartes fue un arquitecto de grandes sistemas, que tuvo escasa fortuna a la hora de definir los detalles. Precisamente estos últimos eran los que fascinaban a Huygens. Como señaló Leibniz, que fue alumno suyo, «no mostraba gusto alguno por la metafísica». Es cierto que la admiración por el autor del *Discurso del método* cegó a Huygens en su primera juventud: «Estaba convencido de que cada vez que tropezaba con alguna dificultad era culpa mía por no haber comprendido su pensamiento». No tardó en desengañarse y en emprender una larga serie de correcciones. Muchas de sus obras se pueden interpretar como refutaciones al filósofo francés: su estudio de las colisiones, por ejemplo, o su óptica geométrica. Hacia el final de su vida firmó una inequívoca declaración de apostasía cartesiana: «En la actualidad no encuentro en toda su física, en su metafísica o en sus aseveraciones sobre meteorología nada que pueda tomar por verdadero». Donde sí hubiera podido llegar a un acuerdo con Descartes hubiera sido en su rechazo a la gravitación universal de Newton y en la búsqueda de una alternativa mecanicista, que explicara la atracción entre cuerpos mediante colisiones contra una corriente de partículas diminutas.

En buena medida, para Huygens entender un fenómeno suponía traducirlo a lenguaje matemático. En este terreno su destreza sobrepasó a la de Galileo y, en realidad, nadie le hizo sombra hasta la llegada de Newton. En una época en que todavía no se habían establecido las fronteras entre matemática pura y aplicada, Huygens fue físico en sus matemáticas y matemático en su física. En su geometría se reconoce el gusto por la mecánica de Arquímedes, que pesaba en una balanza imaginaria las figuras cuya superficie quería delimitar. Veía el mundo con un ojo físico y otro matemático, y con la información que le proporcionaban ambos su mente construía una imagen tridimensional. En cierta ocasión afirmó que la óptica es una disciplina «donde la geometría se aplica a la materia», un enunciado que valdría para resumir su forma de entender la física. Su intuición buscó círculos, curvas y ángulos en el espíritu de la luz y en el corazón de los relojes. El principio de Huygens, en el que se apuntala su interpretación de la óptica,

se puede leer como un tratado de construcción geométrica. Pocos años antes de que iniciara su carrera científica, Descartes había oficiado el matrimonio entre el álgebra y la geometría. Huygens aprovechó la conexión entre ambas disciplinas y también fue un pionero en el uso de ecuaciones. Muchos le atribuyen el honor de haber escrito la primera fórmula física, en 1652.

Es consabido el aserto de Galileo de que el libro de la naturaleza está escrito en lengua matemática. Ahora bien, para describir con propiedad la creciente complejidad de los fenómenos, había que aumentar el vocabulario heredado de los griegos y los árabes. En el siglo XVII Newton y Leibniz acuñaron los neologismos indispensables, cuando desarrollaron el cálculo infinitesimal. La revolución sorprendió a Huygens con sesenta años y asistió a su imparable ascenso con suspicacia. Él había encontrado ya su manera de descifrar matemáticamente el universo, y no necesitaba de intérpretes ni admitía fórmulas prefabricadas.

En su clásico tratado *Principios en el arte de pesar*, Simon Stevin hacía una llamada al pragmatismo: «La reflexión sobre los principios de cualquier arte supone un esfuerzo baldío cuando su propósito no se encamina a la acción». Huygens hizo suya esta consigna. Perteneció a una estirpe mestiza de científicos, como Galileo o Newton, que no levantaban barreras entre la sala de estudio y el taller o el laboratorio. Lo mismo elaboraba teorías que fabricaba herramientas o mejoraba el diseño de aparatos para procurarse mejores observaciones. Siempre sintió debilidad por los instrumentos científicos, por los telescopios, los microscopios, las bombas de vacío o los relojes, que consideró a un tiempo como utensilios y como el escenario de excitantes fenómenos físicos. Su obra favoreció un salto en la instrumentación científica, que impulsó el conocimiento tanto o más que sus leyes o principios.

Huygens prefigura al científico moderno, no ya por sus obras, sino por su actitud, por su conciencia de que la ciencia procede mediante aproximaciones. Él no pretendía descubrir la Verdad, con mayúscula, sino crear modelos operativos: «En el terreno de la física no existen demostraciones ciertas y uno solo puede conocer las causas a través de los efectos, hacer suposiciones basadas en los experimentos o en los fenómenos conocidos y tratar de ve-

rificar si otros efectos se muestran de acuerdo con esas mismas suposiciones». A lo que añadía: «Sin embargo, esta falta de demostraciones en física no debe conducirnos a la conclusión de que todo resulta igual de dudoso, antes bien, debemos ser conscientes del grado de probabilidad en cada caso, de acuerdo con el número de experimentos que tienda a confirmar lo que previamente hemos conjeturado».

Huygens se vio preso de su perfeccionismo. Sus logros se pueden contemplar como un iceberg, del que sus contemporáneos solo atisbaron una octava parte. Dejó así un legado ambiguo, puesto que muchos de sus tesoros solo fueron apreciados por los historiadores. En ese sentido su influencia resultó mucho menos acusada de lo que merecían la calidad y la cantidad de sus descubrimientos. Durante décadas acumuló innovaciones sobre óptica y retuvo su publicación porque las consideraba meros pasos intermedios hacia el objetivo que se había fijado: el diseño de un telescopio que produjera imágenes perfectas. Su nivel de exigencia ante lo que consideraba una obra acabada hizo que muchos de sus resultados solo se dieran a conocer póstumamente, cuando ya se habían convertido en mercancía vieja que otros habían explotado.

En cualquiera de sus tratados brilla un talento singular. Fue un investigador de imaginación fértil, capaz de idear estrategias originales para abordar los fenómenos que lo intrigaban. Su estilo cautivaba incluso a quienes no estaban de acuerdo con él. Otros pudieron redescubrir las mismas leyes o reproducir sus hallazgos astronómicos; sus teorías y sus inventos quizá amarillearon con el paso del tiempo; pero sus creaciones conservan intacto su atractivo. Son clásicos donde sigue vibrando toda la elegancia y la fuerza de su pensamiento. Con herramientas matemáticas al alcance de cualquiera, interpretó la naturaleza como si fuera un instrumento musical al que solo él sabía arrancar ciertas notas.

1629 Christiaan Huygens nace el 14 de abril en La Haya. Es el segundo hijo del poeta y diplomático Constantijn Huygens y Suzanna van Baerle.

1645 Cursa estudios de derecho y matemáticas en la Universidad de Leiden.

1647 Prosigue su formación como diplomático en el Collegium Auriacum de Breda.

1652 Deduce las leyes que rigen las colisiones elásticas. Inicia sus estudios sobre óptica geométrica, que motivarán numerosas mejoras en el telescopio, como el ocular de Huygens, el micrómetro o el diafragma.

1655 En marzo descubre el primer satélite de Saturno, Titán, y meses más tarde deduce la estructura del anillo.

1657 Publica el primer libro sobre probabilidad, inspirado en la correspondencia entre Fermat y Pascal.

1659 Publica el *Systema Saturnium*, en el que recoge sus hallazgos astronómicos y realiza una asombrosa estimación sobre el tamaño relativo de los planetas y las dimensiones del sistema solar. En el curso de su investigación sobre el reloj de péndulo, descubre la tautocronía de la cicloide. También establece el movimiento de un cuerpo bajo la acción de una fuerza centrípeta.

1666 Se instala en París para dirigir la Real Academia de Ciencias francesa, recién fundada por Luis XIV.

1673 Publica el *Horologium oscillatorium*, que contiene una completa descripción de su reloj de péndulo. Diseña relojes regulados por la compresión y expansión de un muelle, invento cuya prioridad le disputa el científico inglés Robert Hooke.

1676 Inicia sus estudios sobre la naturaleza de la luz, que culminarán en el famoso principio que lleva su nombre. Con él logra justificar la doble refracción de un cristal de una variedad de calcita, el espato de Islandia.

1681 Regresa a La Haya.

1689 Viaja a Londres y se encuentra con Isaac Newton. En sus últimos años escribe el *Cosmotheoros*, donde explora la posibilidad de vida en otros planetas. Discute con el filósofo alemán Gottfried Leibniz sobre la relevancia del cálculo infinitesimal.

1690 Publica el *Traité de la lumière*, obra en la que expone su visión sobre la luz. Esta obra servirá de base para la teoría ondulatoria desarrollada por Thomas Young y Augustin Fresnel.

1695 Muere en La Haya, el 9 de julio, a la edad de sesenta y seis años.

CAPÍTULO 1

La geometría de la luz

La luz fue la gran obsesión científica de Huygens, que se inició con su estudio de la óptica geométrica. Sus avances en este campo le permitieron determinar matemáticamente el comportamiento de los rayos luminosos al atravesar cualquier juego de lentes, un conocimiento que aplicó a perfeccionar el telescopio. Culminó este paso de lo teórico a lo práctico con el mayor descubrimiento astronómico desde Galileo: Titán.

Hay familias que se consagran a perfeccionar un oficio y lo transmiten de padres a hijos con la misma perseverancia que su apellido. En la Europa del siglo XVII, el nombre de Huygens evocaba de inmediato el ejercicio de la diplomacia. Lo llevaron con orgullo embajadores, secretarios y consejeros al servicio de la República de las Provincias Unidas, que había partido en dos los Países Bajos tras declarar su independencia frente al dominio español. El padre de Christiaan recibió el nombre de Constantijn para celebrar la constancia de los habitantes de Breda durante la toma de la ciudad en 1581.

La fe calvinista decretaba la salvación o la condenación del alma desde el instante mismo del nacimiento. El pequeño Constantijn tuvo que asumir que además lo predestinaran a servir a un estado que necesitaba de hombres excepcionales para sobrevivir. Su padre, secretario de Guillermo de Orange, lo sometió a una educación tan esmerada como implacable, de la que el niño solo salió bien parado gracias a que era un superdotado. Interpretó a la perfección el papel de cortesano renacentista que le habían asignado, capaz de orquestar alianzas políticas y tratados comerciales al tiempo que componía un madrigal o asesoraba con tino sobre la compra de una obra de arte.

Constantijn frecuentó las principales cortes europeas, con la inevitable excepción española. De joven tocó el laúd para el rey de

Inglaterra. Fue secretario de dos príncipes de la casa de Orange, Federico Enrique y Guillermo II. Los ingleses lo nombraron lord y los franceses, caballero de la Orden de San Miguel. Sus retratos cuelgan en las paredes de la National Gallery de Londres o del Rijksmuseum de Ámsterdam. Descartes fue un huésped habitual de su casa en La Haya y, nada más conocerlo, se asombró de «que una sola mente se ocupara de tantos asuntos y se desenvolviera tan bien en todos ellos». Incluso los menos entusiastas de la política holandesa pueden agradecerle que favoreciera la carrera del joven Rembrandt con encargos oficiales. También supo poner sus talentos al servicio de sí mismo, y de su verdadera pasión, la literatura, que cultivó a salto de mata y en siete idiomas. Al final de su vida había compuesto cerca de 80 000 poemas, una autobiografía y un diario exhaustivo, que le ganaron un sitio de honor en las letras holandesas.

Cuando le llegó el turno de educar a sus hijos, Constantijn intentó aplicarles la misma plantilla que había conformado su propio carácter, para hacer de ellos funcionarios de una élite al servicio del estatúder.

BAJO EL SIGNO DE SATURNO

Christiaan Huygens nació el 14 de abril de 1629, la madrugada de un sábado. Para los holandeses no era el día del *sabbat* sino el día de Saturno, un claro aviso para navegantes, puesto que el anillo del planeta coronaría su gloria científica. Días antes del parto, la madre, Suzanna van Baerle, tuvo una corazonada. Tras cruzarse en la calle con un chico de rostro deforme, se convenció de que daría a luz a un monstruo. La fortuna le quiso llevar la contraria y Christiaan vino al mundo sin taras. Suzanna fue una mujer de gran cultura, talento para la pintura e ingenio, que sabía burlarse con sutileza de los barrocos poemas que le dedicaba su marido. Gran parte de su vida se vio asediada por la mala salud y unas migrañas demoledoras, que formaron parte de la herencia genética que legó a su hijo Christiaan. Como tantas mujeres, se jugó la vida en cada

embarazo. Los partos la dejaban postrada en la cama días o semanas enteras. Alumbró cuatro hijos varones. El quinto fue una niña y esta vez, después de debatirse dos meses contra la intermitencia de las fiebres, Suzanna sucumbió a una infección. El pequeño Christiaan tenía entonces ocho años y durante mucho tiempo se negó a abandonar la falda de luto.

Huygens se crió con el fragor de las campañas contra los españoles de fondo. Su padre trabajaba para Federico Enrique, un príncipe aquejado de una severa adicción a la estrategia militar, que pasaba más tiempo en el campo de batalla que en su residencia oficial. Aunque sus obligaciones lo mantuvieron alejado de sus hijos, Constantijn se preocupó de diseñar y supervisar con cuidado su programa de estudios. Los dos mayores, Constantijn y Christiaan, compartieron tutores y también aunaron fuerzas para aliarse contra ellos. El profesor de latín, Henrick Bruno, daba fe de esta rebeldía:

> No se aplican a ninguna de las tareas que les encomiendo, me desafían con descaro y hacen lo que les da la gana. Bruno no existe, no es más que aire.

Así que a veces, cuando Constantijn dejaba el frente español tranquilo, corría para apaciguar el que se le acababa de abrir en casa. A pesar de que el padre fomentaba una competencia moderada entre los hermanos, ambos mantuvieron una relación muy afectuosa a lo largo de su vida.

Constantijn registró con rigor notarial el desarrollo de sus hijos, en su diario. Contempló los primeros pasos de Christiaan con reparos. El niño tartamudeaba, memorizaba mal, tendía a ladear la cabeza y le gustaba hablar solo. A partir de los ocho años, sin embargo, tuvo que rectificar el tono de las anotaciones para reflejar una progresión meteórica. Acostumbrado a ejercer de cazatalentos para la corte, Constantijn se sintió en la obligación de ganar al joven prodigio a la causa de la poesía. A partir de los catorce años fue incapaz de arrancarle más versos latinos a Christiaan, ya fuera «mediante órdenes, promesas o reproches». Harto de recitar de memoria a Virgilio, lo que el niño quería era que le enseñaran aritmética.

Sus primeros tutores fueron estudiantes de teología o aspirantes a poetas, que se sentían incómodos ante su obsesión por los modelos mecánicos. Uno de ellos advertía así al padre del peligro:

> Christiaan [...] vuelve a enredar con juguetes que él mismo se fabrica, con pequeñas construcciones y máquinas. Demuestran gran ingenio, sin duda, pero están totalmente fuera de lugar. Señor, no querrá que su hijo se convierta en un artesano. La República, que ha depositado tan altas esperanzas en él desde su nacimiento, confía en que siga el ejemplo de su padre y se dedique a los negocios.

El niño planteaba pocos problemas cuando lo dejaban tranquilo, pero ofrecía una resistencia adamantina cuando lo obligaban

EL HEREDERO DE ARQUÍMEDES

Simon Stevin (1548-1620) era incapaz de observar una obra cualquiera salida de la mano del hombre sin obsesionarse con el modo de perfeccionar su diseño, ya se tratara de un molino, una bomba de agua, una esclusa o la brida de un caballo. Este hijo ilegítimo de Brujas supo auparse a pulso y a base de talento desde la cuna más humilde hasta la corte de los Orange, donde su pericia como contable e ingeniero militar le ganaron el aprecio del príncipe Mauricio. Su espíritu inquieto bebió con frecuencia de la obra de Arquímedes, que logró trascender. Descubrió la paradoja hidrostática: la presión que ejerce un líquido es independiente de la forma del recipiente y depende solo de la altura que alcance. Su tratado *De Thiende* («La décima») extendió en toda Europa el uso de las fracciones decimales. Polígrafo incansable, produjo obras de trigonometría, aritmética, geometría, perspectiva, música, política, agrimensura y náutica. También determinó el mejor modo de erigir fortificaciones o de organizar un campamento militar.

El análisis del equilibrio

Entre sus invenciones, la que más celebraron sus contemporáneos fue un vehículo terrestre a vela, que dejaba atrás a cualquier caballo a galope tendido. Él prefería su análisis del equilibrio de los cuerpos en un plano inclinado. Concibió un argumento ingenioso mediante una sarta de esferas iguales dispuesta en torno a una doble cuña. Las masas tenían que alcanzar el equilibrio, ya que de lo contrario la sarta rodaría sin detenerse jamás, poniendo en marcha una

a malgastar su inteligencia en cosas que no le interesaban. Cuando cumplió quince años el padre tiró la toalla y decidió alimentar el fuego en lugar de sofocarlo. Contrató a un tutor especial, Jan Stampioen, un hombre que se había ganado una reputación como profesor y como matemático: había dado clases al hijo del príncipe Federico Enrique y había desafiado en público a Descartes con un problema de geometría, desdeñando después la solución que le presentara. Diseñó para Christiaan un amplio programa de lecturas que repasaba las obras de Ptolomeo, Copérnico, Stevin, Brahe, Kepler y el mismo Descartes. Además de poner al joven al día en materia científica, le aconsejó que, en la medida de lo posible, tratara de llegar siempre a sus propias conclusiones en lugar de asimilar las de los demás. Una ardua recomendación que

máquina de movimiento perpetuo. Puesto que el número de esferas es proporcional a la longitud de las rampas, también ha de serlo la masa total que se apoya en cada una de ellas. Así concluyó que dos cuerpos unidos por una cuerda, sobre rampas asimétricas, se hallarán en equilibrio cuando sus pesos sean proporcionales a la longitud de los planos. Se sospecha que Galileo nunca dejó caer dos esferas —una de madera de roble y otra de plomo— desde lo alto de la Torre de Pisa. La leyenda sería un refrito del experimento que llevó a cabo Stevin, encaramado a una torre de la iglesia de Delft. Para refutar la tesis aristotélica de que la velocidad de caída de los cuerpos resulta proporcional a su peso, soltó dos esferas de plomo, una diez veces más pesada que la otra, que tocaron el suelo casi al mismo tiempo.


DE
BEGHINSELEN
DER WEEGHCONST
BESCHREVEN DVER
SIMON STEVIN
van Brugghe.

TOT LEYDEN,
Inde Druckerye van Christoffel Plantijn,
By Françoys van Raphelinghen.
clↄ. Iↄ. LXXXVI.

La cadena de esferas ilustró la cubierta del tratado *De Beghinselen der Weeghconst* («Principios en el arte de pesar»).

Huygens siguió al pie de la letra. Constantijn respetaba las inquietudes científicas de su hijo, pero no se apartó un milímetro de su propósito de hacer de él un perfecto cortesano. Antes de acudir a la universidad, sabía retórica, esgrima, tocar el laúd, la viola de gamba y el clavecín, montar a caballo, cazar, cantar, bailar, patinar sobre hielo y pintar. Además de su lengua materna dominaba el griego, el latín, el italiano y el francés. Y lo que es más importante, era diestro en el arte de la conversación y sabía conducirse como un aristócrata.

EL MATEMÁTICO FRUSTRADO

El florecimiento de la física y las matemáticas en Holanda estuvo estrechamente ligado a la ingeniería militar. En la misma proporción en que el desarrollo de la ciencia escamaba a las autoridades eclesiásticas, seducía a los nobles protestantes. Los pioneros en el arte de la mecánica, como Simon Stevin, fueron expertos en la construcción de fortificaciones. Seguían la estela de Leonardo o de Galileo, que llamaban a la puerta de príncipes y mecenas para venderles las ventajas militares de sus ingenios. En el año 1600 el estatúder Mauricio, hermano mayor de Federico Enrique, encomendó a Stevin la fundación de una escuela de ingeniería en Leiden. Resulta significativo que se estableciera en un convento que había desalojado la reforma protestante. Stevin convirtió las matemáticas en la columna vertebral de su plan de estudios.

A los dieciséis años, Christiaan viajó a Leiden para matricularse en la universidad. Había alcanzado un nuevo compromiso entre sus intereses y los de su padre: cada día atendería a dos clases de jurisprudencia por una de matemáticas. En esta última asignatura tuvo como maestro a Frans van Schooten (1615-1660). Más recreador que creador, Van Schooten fue un hombre de un singular talento didáctico, que explicaba la ciencia de vanguardia mejor que sus creadores. Publicó obras de Viète y Fermat, que hasta entonces circulaban solo en versiones manuscritas. No se conformaba con componer los libros y enviarlos a la imprenta,

sino que enriquecía sus ediciones con comentarios y apéndices extensos, que cubrían lagunas de los autores y facilitaban la asimilación de las novedades. Van Schooten sentía debilidad por Descartes. No solo divulgó su obra, también su aspecto: fue el autor de uno de los escasos retratos auténticos que se conservan del filósofo. Como profesor, sirvió de punto de acreción de una productiva escuela física y matemática. Guiaba los proyectos de investigación de sus alumnos y a menudo publicaba sus obras como anexos de los libros que editaba. Uno de los más populares, *Exercitationes mathematicae* («Ejercicios de matemáticas»), se cerraba con *De ratiociniis in ludo aleae* («Del razonamiento en los juegos de azar»), un estudio sobre el cálculo de probabilidades de Huygens. El *Exercitationes* fue uno de los textos que Newton leyó durante su etapa de estudiante en Cambridge.

Transcurridos dos años, Constantijn arrancó a Huygens de su edén matemático en Leiden para emplearlo como peón en el tablero de ajedrez donde se estaba jugando su carrera política. La muerte de Federico Enrique había entregado el poder a su hijo Guillermo y la corte mudaba con la savia de una generación nueva. Para granjearse la simpatía del joven estatúder, Constantijn envió a sus tres hijos mayores al Collegium Auriacum de Breda, cuyo rector, André Rivet, había sido tutor de Guillermo. Breda ofrecía un ambiente menos estimulante que Leiden, al menos desde un punto de vista científico, pero los hermanos Huygens tampoco se aburrieron. La costumbre de los alumnos de ir a clase armados desembocó en una pendencia entre el hermano pequeño, Lodewijk, y un estudiante borracho. Ante la llamada de atención del rector Constantijn los devolvió a casa indignado.

En el plan trazado para Christiaan, la siguiente etapa consistía en perfeccionar su instrucción jurídica, la piedra angular en la formación de cualquier diplomático. Él mismo advirtió a su hermano mayor de lo que se avecinaba: «Sospecho que nuestro padre pretende que nos dejemos caer por el despacho de abogados, pero confío en que la cosa no dure demasiado». Todo el entusiasmo que le faltaba lo ponía su padre a la hora de recomendarlo para su primera misión diplomática. En la hiperbólica carta de presentación que Constantijn dirigió a Enrique, conde de Nassau-Siegen,

la ciencia era casi una curiosidad entre los muchos talentos que adornaban al joven Christiaan.

La retahíla debió de causar la impresión buscada, porque en octubre de 1649 Christiaan acompañó al conde Enrique en su embajada al reino de Dinamarca que pretendía reducir el tributo que los barcos holandeses pagaban por atravesar el estrecho de Oresund. Cumplido su deber, el joven dejó atrás la corte en Flensburgo y visitó el castillo de Hamlet, en Elsinor. Quizá desde lo alto de una de sus torres entonó su particular ser o no ser, para protestar por la sombra que su padre proyectaba sobre su futuro. Desde la atalaya se avistaba la costa sueca, a solo 4 km de distancia, y Christiaan acarició el proyecto de cruzar el estrecho para visitar a Descartes, que residía entonces en Estocolmo y daba clases particulares a la reina Cristina. El plan se vio frustrado por las tormentas. Quizá fuera psicosomático, pero al regreso de este primer contacto con su porvenir profesional, Huygens cayó enfermo.

«Un muchacho versado no solo en leyes [...], sino también en francés, latín, griego, hebreo, sirio y caldeo, que además destaca como matemático, músico y pintor.»

— Carta de Constantijn presentando a su hijo al conde de Nassau-Siegen.

Ironías del destino, fue otra enfermedad inesperada la que vino a sacarlo del atolladero. La viruela casi se había convertido en un examen obligatorio para los europeos del siglo XVII, del que no se libraban ni los aristócratas. En el otoño de 1650, Guillermo II, que acababa de imponerse a sus adversarios políticos, era vencido por un virus. No llegó a conocer a su único hijo, que nació ocho días después de su muerte. Los partidarios de una verdadera república trataron de aprovechar el período de regencia para desmontar lo que seguía siendo de facto una monarquía hereditaria. La lealtad de los Huygens a la Casa de Orange les cerró el acceso a los puestos oficiales. Se habían convertido en especialistas de una profesión que ya no podían ejercer. Para Constantijn supuso un duro golpe; para sus hijos, no tanto. El mayor disfrutó









FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Constantijn Huygens rodeado de sus hijos. La tradición pictórica situaba al primogénito a su derecha, lo que permite identificar a Christiaan a su izquierda.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Christiaan pintado por Bernard Vaillant en 1686 a partir de un dibujo de su hermana Suzanna.

FOTOS INFERIORES:
Frans van Schooten, profesor de Christiaan, y el retrato que el matemático realizó de Descartes. Al pie figura un texto de Constantijn.

de una tregua. Mientras el niño heredero crecía para convertirse en Guillermo III, al que serviría como secretario, aprovechó para beber, pintar y dilapidar su exquisita educación como don Juan. Christiaan obtuvo vía libre para dedicarse a la ciencia.

PRIMERAS INVESTIGACIONES

Gracias a Van Schooten, Huygens había ganado toda la competencia matemática que cabía adquirir antes de la invención del cálculo infinitesimal. Sus primeros logros se produjeron en el campo de la geometría, en ramas que hoy se contemplan como curiosidades pasadas de moda. Es el caso de las cuadraturas, una virguería geométrica que consiste en construir un cuadrado a partir de otra figura cualquiera, de modo que ambas presenten áreas iguales. Las únicas herramientas que se permiten para su composición son la regla y el compás, un requisito que desbarata algunas cuadraturas, como la del círculo. Hasta que el matemático alemán Ferdinand von Lindemann demostró su imposibilidad en el siglo XIX, se malgastaron en el empeño ímprobos esfuerzos. A los veintidós años, Huygens localizó un error en uno de los intentos más intrincados, obra de un jesuita flamenco, Gregorio de San Vicente. Huygens perfeccionó su propio método para elaborar cuadraturas, que aplicó a las secciones cónicas (elipses, hipérbolas y parábolas). Mediante una cuadratura aproximada del círculo, mejoró el método de Arquímedes para calcular decimales de π.

Van Schooten celebró estos trabajos, convencido de que se podían situar sin desmerecimiento junto a las grandes obras de los griegos. Y tenía razón, pero las matemáticas del siglo XVII estaban experimentando un cambio de rumbo vertiginoso que apartaría su mirada del mundo clásico. Aunque los alardes de geometría de Huygens tendrían escasa repercusión en la historia de las matemáticas, le granjearon la admiración de sus contemporáneos. También le proporcionaron un juego de herramientas fiables con las que desmontar el mecanismo de la naturaleza.

Huygens compartía el gusto de Arquímedes por la mecánica, y en las páginas de ambos conviven los triángulos y los pesos, las parábolas y los centros de gravedad, de modo que cuesta precisar dónde acaba la física y comienzan las matemáticas, y viceversa. Existe una palabra holandesa que se diría acuñada ex profeso para él: *vernufteling*. Expresa la destreza a un tiempo de la mano y de la mente. Ya en su infancia había apuntado las obsesiones que lo perseguirían a lo largo de su vida: los mecanismos y la matemática. Huygens no fue artífice de grandes sistemas, como Descartes o Newton, era un cazador de fenómenos intrigantes, que abordaba con la actitud de quien destripa un aparato para descubrir sus engranajes. En lugar de llaves y destornilladores, Huygens se servía del álgebra y la geometría. Todas sus pasiones concurrieron en ciertos inventos, como los telescopios y los relojes, surgidos en un cruce casi mágico entre la artesanía, la física y las matemáticas.

En Huygens se produce así una curiosa tensión entre la abstracción pura y el pragmatismo del artesano, empeñados ambos en un mismo objetivo. Una excelente muestra de esta dualidad se puso de manifiesto muy pronto, en su trabajo sobre óptica. Su interés por las propiedades de las lentes lo embarcó, inadvertidamente, en su mayor empresa científica. A ella se dedicaría con intermitencias a lo largo de toda su vida. Le condujo a una larga serie de innovaciones en el diseño de telescopios y a sorprendentes hallazgos astronómicos, pero sobre todo desembocó en una de las indagaciones más profundas sobre la naturaleza de la luz. Se trata de una historia de final agridulce para Huygens, en un duelo desigual con Newton, pero el primer acto, que nos conducirá hasta los confines del sistema solar, fue formidable.

LOS LABERINTOS DE LA LUZ

A finales de octubre de 1652, Huygens confesaba a Van Schooten: «La dióptrica me absorbe por completo». Kepler había introducido el término «dióptrica» en 1611 para referirse al estudio matemático de la refracción —la desviación de la trayectoria de

FIG. 1

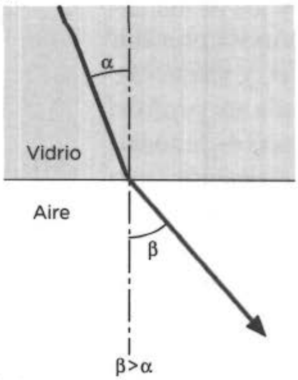


FIG. 2

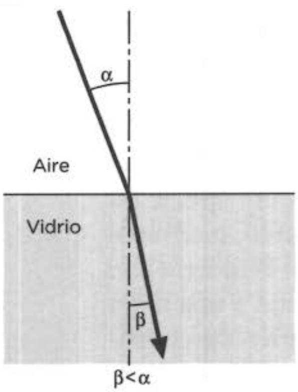
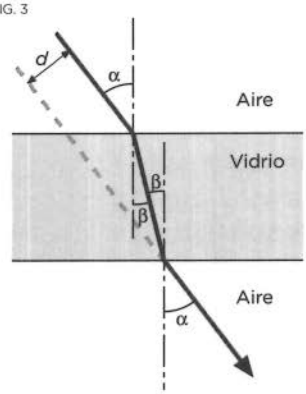


FIG. 3



la luz— al atravesar un juego de lentes. La teoría capaz de explicar de forma coherente todos los fenómenos asociados a la interacción de la luz con la materia no cuajó hasta bien entrado el siglo XX. Sin embargo, para diseñar instrumentos ópticos basta con la aproximación de la óptica geométrica, que considera la luz compuesta por un haz de líneas rectas. A continuación vamos a resumir en qué estado se hallaba la dióptrica antes de que Huygens se aplicase a su estudio.

La luz se refracta, o desvía, al cruzar la frontera entre dos medios materiales que permitan su paso. Una parte de la luz también se refleja, un aspecto que aquí no tendremos en cuenta y que limita sobre todo el número de lentes que se pueden incorporar en un sistema óptico. Cuantos más cristales se vea obligada a atravesar la luz, más se perderá por el camino, dando lugar a una imagen más mortecina.

El fenómeno de la refracción se observa con facilidad en la materia transparente común, cuando los rayos de sol recorren diversas combinaciones de agua, aire o vidrio. El grado de la desviación depende de cada pareja de medios. Así, un rayo de luz se abre ($\beta > \alpha$) al pasar del vidrio al aire (figura 1), y se cierra ($\beta < \alpha$) al pasar del aire al vidrio (figura 2).

Cuando atraviesan un cuerpo transparente, los rayos luminosos deben cruzar dos veces la frontera. Experimentan por tanto una doble refracción: al entrar y al salir. Si las dos fronteras son planas y paralelas, la desviación se traduce en un desplazamiento

d lateral de los rayos, como ocurre en el cristal de una ventana (figura 3).

Si se deforma la frontera, su contorno «desordenará» los rayos de luz y los desviará en múltiples direcciones, en función del punto en que la hayan cruzado (figuras 4 y 5).

Estas desviaciones se pueden organizar de acuerdo a una pauta determinada, de manera que produzcan una imagen.

Para el análisis que sigue resulta cómodo asumir que los objetos que nos rodean emiten luz visible. En cierto sentido lo hacen, aunque se trate de una emisión condicionada, que se produce como reacción a la luz que reciben (del Sol o de una bombilla, por ejemplo). Los átomos que componen la materia interactúan con los fotones —partículas de luz— que llegan a su superficie y en el proceso desprenden nuevos fotones. La calidad de la luz así emitida depende de dos factores: de cómo sea la luz que llega hasta la materia y de la estructura de la propia materia —qué átomos la forman y cómo se organizan en el espacio—. No es lo mismo iluminar una manzana con luz solar que con luz roja artificial; tampoco es lo mismo iluminar la manzana que un cenicero de cristal o un espejo. Se puede situar bajo una lámpara un libro o una naranja. Ambos reciben idéntica luz de la bombilla, pero interactúan con ella de manera diferente y nos enviarán rayos luminosos distintos. Estas discrepancias proporcionan información sobre cómo son los objetos. A la hora de estudiar la formación de imágenes, nuestro punto de partida será la luz visible que desprenden los cuerpos.

FIG. 4

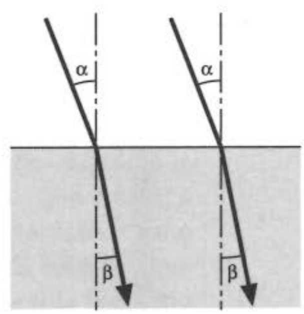
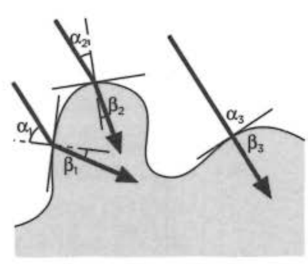


FIG. 5



Es el caso del lápiz, con una mina azul, de la figura 6 (página siguiente). De cada punto de su superficie parten rayos luminosos en muchas direcciones. La naturaleza de estos rayos contiene información sobre la forma y la composición del lápiz. Los que

FIG. 6

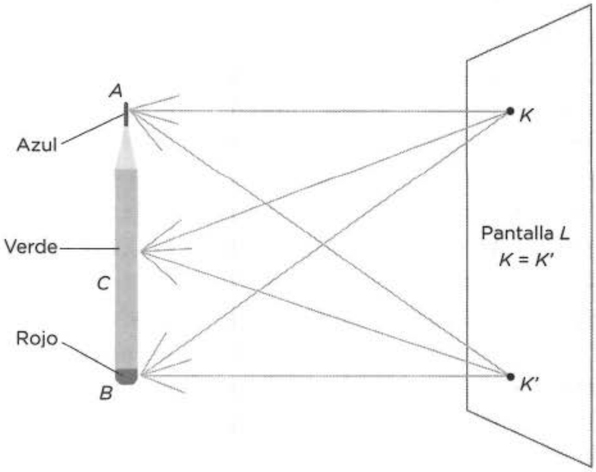


FIG. 7

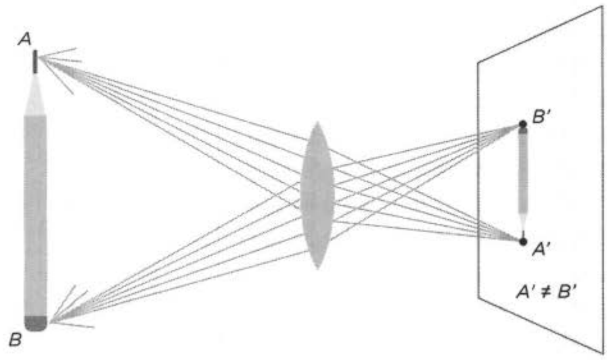
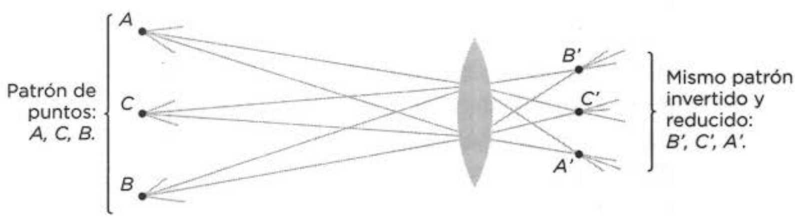


FIG. 8



escapan del extremo *A* han interactuado con la mina azul, que absorbe los colores verde y rojo. Los que surgen de *C*, han interactuado con una capa de pintura verde que absorbe el rojo y el azul. Por último, aquellos que llegan de *B* han interactuado con la pintura roja de la base, que absorbe el azul y el verde. Todos los puntos del lápiz han recibido rayos similares, pero de ellos emanan rayos distintos, cuya diversidad propaga la información sobre su aspecto. Esta información, en general, se pierde en el espacio. Si colocamos una pantalla *L* frente al lápiz, a cada punto de su superficie llegarán rayos luminosos procedentes de toda la superficie del lápiz. A *K*, por ejemplo, llegarán rayos azules, verdes y rojos, como a cualquier otro punto de la pantalla, *K*'. De modo que todos los puntos de *L* recibirán el mismo tipo de luz del lápiz: serán indistinguibles. No ofrecen información alguna sobre el aspecto del objeto.

Si entre la pantalla y el lápiz colocamos una lente de vidrio (figura 7), se produce un cambio radical. Todos los rayos azules que parten del punto *A* y tocan la lente convergen en otro punto, *A*', de la pantalla, que también será azul. Lo mismo sucede con los rayos rojos de *B*, que acabarán en un punto rojo *B*', y con cualquier otro punto de la superficie frontal del lápiz. Las diferencias de luz ya no se mezclan y confunden a lo largo y ancho de la pantalla. La lente lleva a cabo una separación selectiva de rayos, debido a la propia geometría de su contorno y a la refracción, que asigna a cada punto del lápiz un punto característico de la pantalla. Como resultado, en ella se proyectará una imagen invertida del lápiz, que conserva la información sobre su apariencia que había recogido la luz al interactuar con él. Esta transmisión de datos a través de la luz es lo que llamamos «ver», puesto que nuestros ojos incluyen lentes que proyectan una imagen en las células fotosensibles de la retina.

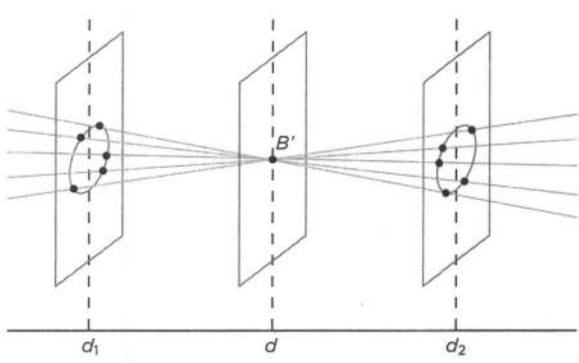
Si no interponemos una pantalla, una retina o una lámina de material fotosensible, los rayos se cruzan detrás de la lente en los puntos *A*', *B*', *C*', etc. y continúan su camino sin interferirse (figura 8). Por tanto, estos puntos se pueden considerar como generadores de un patrón de rayos similar (invertido y a una escala diferente) al que abandonó la superficie del lápiz.

Por la misma razón, la imagen será nítida solo a una distancia determinada d de la lente, donde convergen los haces de rayos dando lugar a A', B' y C'. Allí es donde hemos colocado la pantalla en las figuras. Si la situamos un poco antes (en d_1) o un poco después (en d_2) todos los rayos que proceden de B, por ejemplo, no se cruzarán en el mismo punto, generando un solo B', sino que proyectarán un círculo (figura 9). Cada punto original del lápiz producirá así una mancha luminosa. El resultado recuerda al efecto de imprimir en un papel absorbente, donde cada punto se desparrama. Al superponerse unos con otros, los círculos componen una imagen borrosa.

Desde su fundación, el principal objetivo de la dióptrica fue establecer el tamaño de la imagen y la distancia a la que se genera con nitidez, en función de dónde se haya situado la fuente de los rayos. La clave para resolver la cuestión reside en la «distancia focal», que es la distancia a la que converge un haz de rayos paralelos tras incidir sobre la lente (figura 10). Seguramente se determinó por primera vez de modo experimental, al prender un fuego concentrando los rayos solares con un vidrio curvado. El punto de convergencia recibe el nombre de «foco» y lo representaremos mediante la letra f.

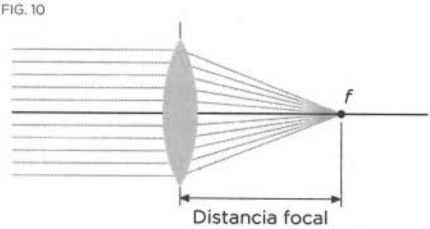
La distancia focal es el atributo óptico más importante de las lentes y, de algún modo, mide su capacidad para desviar la luz.

FIG. 9



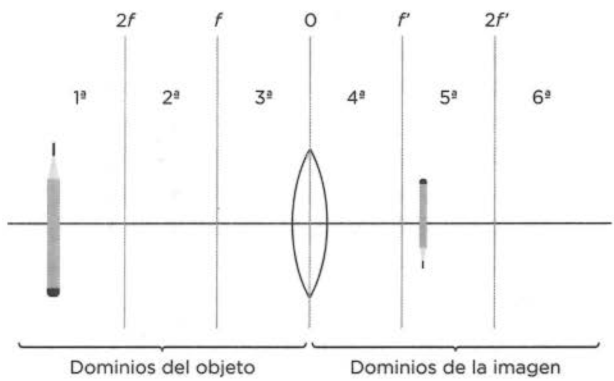
Depende del material y también de su geometría, a saber, del grado de curvatura de sus fronteras, lo que incide también en su grosor. Cuanto más pronunciada sea la curvatura de la lente (y por tanto su espesor), menor será la distancia focal, y viceversa.

FIG. 10



La distancia focal permite dividir el espacio frente a una lente en tres grandes regiones, que facilitan el estudio de cómo evolucionan las imágenes en función de dónde se sitúe el objeto. La primera región se extiende desde dos veces la distancia focal hasta el infinito. La segunda región, desde la distancia focal hasta dos veces la distancia focal. La tercera, desde la lente hasta la distancia focal. Estas tres regiones integran los dominios del objeto. Se pueden establecer tres regiones simétricas al otro lado de la lente (cuarta, quinta y sexta), que corresponden a los dominios de la imagen. Una vez delimitado el terreno de juego (figura 11), podemos comenzar la partida situando el lápiz azul en la primera región. La lente producirá una imagen más pequeña e invertida en la quinta. Cuanto más lejos se encuentre el lápiz, más cerca quedará la imagen de *f*'. A medida que lo vayamos acercando, la ima-

FIG. 11



gen crecerá al mismo tiempo que se aproxima a $2f'$. Los objetos situados en esta primera región producen imágenes útiles para las cámaras fotográficas, ya que a la hora de hacer fotos nos interesa «meter» un paisaje o el rostro de una persona en un rectángulo de unos pocos centímetros.

Justo en el momento en el que el lápiz alcanza $2f$, la lente forma una imagen invertida del mismo tamaño en $2f'$. Si el lápiz prosigue su avance y se interna en la segunda región, dará lugar a una imagen aumentada e invertida en la sexta. Cuanto más se acerque el lápiz a f, mayor será la imagen y más lejos retrocederá, más allá de $2f'$. Por esta razón, esta segunda región se aprovecha para proyectar imágenes, en una pantalla de cine por ejemplo.

Cuando el lápiz alcanza f, la lente es incapaz de producir ninguna imagen. Los haces que tuerce no se organizan de acuerdo con ningún patrón útil. Una vez dentro de la tercera región, sin embargo, la lente pasa a desviar los rayos luminosos de una manera muy peculiar (figura 12). No produce una imagen real, que se pueda proyectar en una pantalla o en el interior de una cámara. Los rayos se organizan de modo idéntico a como lo harían si procediesen de una versión mucho más grande del lápiz, que no se muestra invertida. Es lo que se conoce como una «imagen virtual». Este efecto se aprovecha en las lentes de aumento, que se colocan muy cerca de los objetos, para situarlos en la tercera región de la lupa.

En torno a 1608 se descubrió por accidente que al combinar las desviaciones sucesivas de dos lentes se obtenían imágenes aumentadas de objetos remotos. Se acababa de inventar el telescopio. La figura 13 muestra un esquema de cómo se disponen los cristales para explotar las prestaciones ópticas de sus diversas regiones. Obviamente, los telescopios apuntan a objetos que se encuentran mucho más lejos que dos veces la distancia focal de su primera lente, el objetivo. Por tanto, este materializa una imagen más pequeña entre su f' (en la figura, f'_{ob}) y su $2f'$. Esta imagen se podría registrar en una cámara. La misión del objetivo es «cazar» el objeto lejano y poner su imagen a tiro de la segunda lente, el ocular. Este trabaja como una lupa. Se ubica de manera que la imagen generada

FIG. 12

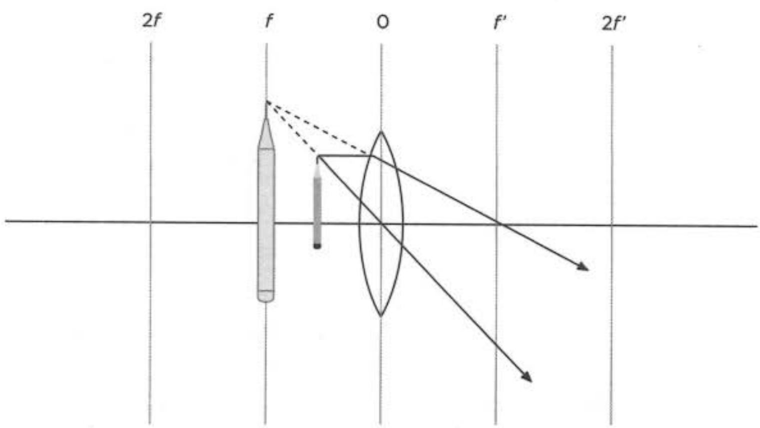
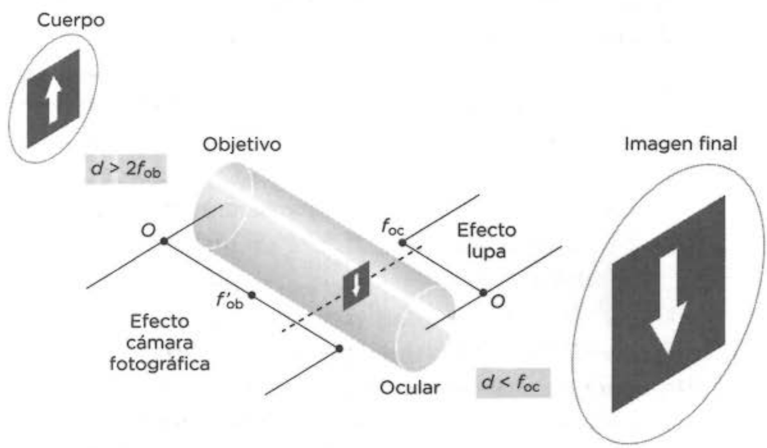


FIG. 13



por el objetivo caiga en su tercera región (entre el ocular y su foco, f_{oc}), para crear, a partir de ella, una imagen virtual muy aumentada. En la figura 14 (página siguiente) se puede apreciar la trayectoria de los rayos. El objetivo genera los puntos A' y B', que caen en la tercera región del ocular. Este último genera una imagen virtual con puntos A'' y B''.

FIG. 14

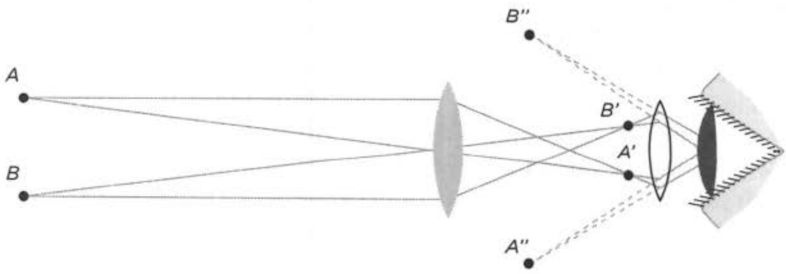
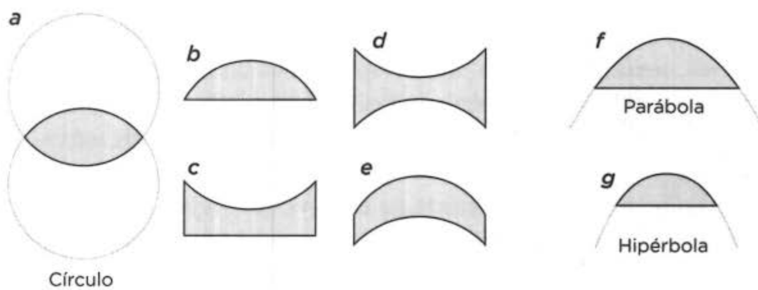


FIG. 15

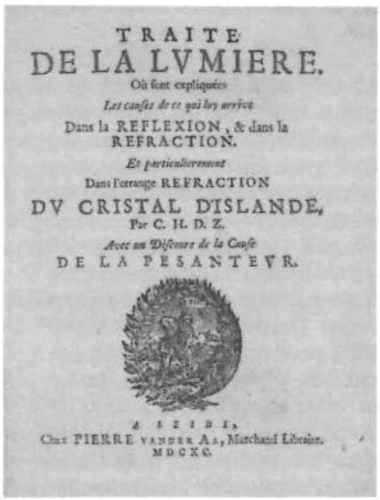


Los objetivos suelen ser relativamente grandes. Cuanta mayor superficie presenten más luz recogerán, una condición indispensable para definir objetos de los que nos llega muy poca luz, como sucede con las estrellas. El ocular ofrece un grosor y una curvatura mayores, para acortar la distancia focal, torcer con más fuerza la luz y proporcionar así un aumento superior. Aunque no lo hayamos especificado hasta ahora, hemos estado hablando siempre de un tipo de lente particular, la biconvexa. Pertenece a la familia de las lentes esféricas, con fronteras de sección circular, como las que se representan en la figura 15 (*a* es biconvexa, *b*, planoconvexa, *c*, planocóncava, *d*, bicóncava y *e*, concavoconvexa). También existen otras familias, con perfiles parabólicos (*f*) o hiperbólicos (*g*).

En la naturaleza, los rayos de luz no muestran un comportamiento tan disciplinado como en los dibujos. Los telescopios nacieron aquejados de dos enfermedades ópticas, la aberración esférica y la aberración cromática, que comprometen la calidad de sus imágenes. Las lentes esféricas se comportan como lentes ideales solo con los rayos que las cruzan cerca de su centro, lo que reduce el campo de visión útil.

LAS ABERRACIONES DE LA LUZ

La aberración esférica obedece a que una lente esférica no dirige al mismo punto todos los rayos luminosos paralelos que inciden sobre su superficie, lo que produce imágenes borrosas. Para componer una imagen nítida, hay que combinar las desviaciones que introduce la refracción con las que causa el perfil de la lente. Una frontera de vidrio circular solo hace converger a un mismo foco los rayos próximos a su centro. A medida que los rayos se alejan camino del borde, se intensifica la divergencia. Para que una lente de vidrio produzca imágenes sin aberración esférica su frontera debe curvarse siguiendo contornos no circulares, como los de una elipse o una hipérbola, impracticables con las técnicas artesanales que se conocían en la época de Huygens. La naturaleza cuenta con recursos superiores y los trilobites, unos artrópodos marinos ya extinguidos, incorporaban hace millones de años, en sus ojos, diseños como los que soñó Descartes. La aberración cromática se debe a un motivo distinto. Al atravesar el vidrio de una lente, la luz blanca no se desvía en bloque, sino que se abre en un abanico de colores, como hace al cruzar un prisma. Así, cada punto se desparrama, creando una imagen borrosa.

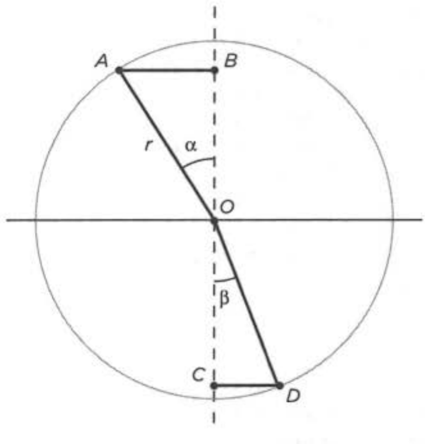

TRAITE
DE LA LVMIERE.
Où sont expliquées
Les causes de ce qui luy arrive
Dans la REFLEXION, & dans la REFRACTION.
Et particulierement
Dans l'etrange REFRACTION
DV CRISTAL D'ISLANDE,
Par C. H. D. Z.
Avec un Discours de la Cause
DE LA PESANTEVR.
A LEIDE,
Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire.
MDCXC.

Portada del *Tratado de la luz* de Huygens, obra que contiene diseños de lentes que corrigen la aberración esférica.

HUYGENS ENTRA EN ESCENA

La invención del telescopio no validó de manera automática la teoría de Copérnico, pero alteró de forma dramática los términos del debate entre los partidarios y los adversarios del heliocentrismo. El universo aristotélico se había construido a partir de lo que el ojo humano era capaz de distinguir a simple vista. Lo que caía fuera de su alcance se había completado con una singular mezcla de lógica e imaginación. La fascinación griega por las formas redondas había postulado la necesidad de una Luna y unos planetas de una esfericidad perfecta. Una de las objeciones

LA LEY DE LA FRONTERA



Ya en el año 984, el persa Ibn Sahl había formulado la ley de la refracción en su Libro sobre los instrumentos incendiarios, pero ningún astrónomo occidental acusó recibo. En el siglo XVII fue redescubierta un mínimo de tres veces. Thomas Harriot lo hizo en 1601, pero no se molestó en publicarla. Willebrord Snell repitió el hallazgo en 1620 y solo lo divulgó entre un reducido círculo de afortunados, a través de su correspondencia. Descartes llegó a las mismas conclusiones que sus predecesores a finales de la década de 1620. A la tercera fue la vencida y él sí publicó la relación en uno de los apéndices del *Discurso del método*. Como vivió una larga temporada en Holanda, muchos compatriotas, Huygens entre ellos, se maliciaron que, en un descuido, el francés le había echado un ojo a alguna carta de Snell. No parece que la acusación sea justa. En cualquier caso, la ley se quedó con el nombre de Snell. Mucho antes que todos ellos, Ptolomeo había tabulado los ángulos que forma la luz al cruzar la frontera del agua. Observó cómo a medida que aumenta α, se incrementa β, pero que la progresión no es lineal. Fue incapaz de dar con una fórmula matemática que al introducir el primer

al heliocentrismo argüía que si la Tierra debía perder su posición central en el universo, ¿por qué retenía ciertos privilegios, como ser el único planeta con satélite? A partir de 1610, Galileo reveló el verdadero rostro de la Luna, que la distancia ya no maquillaba, con sus cráteres y montañas, y las cuatro lunas de Júpiter. El telescopio revelaba con crudeza un sistema solar que desmentía especulaciones milenarias, basadas en la falta de información.

Fascinado por la contundente exhibición de Galileo, Kepler se propuso perfeccionar el telescopio. Hasta entonces las mejoras en el instrumento se venían introduciendo por el procedimiento de ensayo y error. Kepler no confiaba en el azar. Quiso corregir los

ángulo produjera automáticamente el segundo. En su *Tratado sobre la luz*, Huygens recurría al dibujo de la figura para deducir la ley de refracción. Ilustra un rayo de luz que atraviesa el aire desde *A* hasta *O*, donde toca la superficie horizontal de un bloque de vidrio. Su trayectoria recta forma un ángulo α con una imaginaria línea vertical que sirve de referencia. Al cruzar la frontera, el rayo se desvía y atraviesa el vidrio a lo largo de otra línea recta, bajo un ángulo menor, β, desde *O* hasta *D*. Para hallar la relación entre α y β basta con trazar un círculo de radio arbitrario *r*. El cociente entre la longitud de los segmentos *AB* y *CD* es constante para cualquier pareja de ángulos α y β y vale aproximadamente 1,52.

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{CD}}=\frac{\overline{A'B'}}{\overline{C'D'}}=1{,}52$$

Este número cambia para otras parejas de medios. En el paso del aire al agua vale 1,33. La relación entre los segmentos se puede expresar en función de los ángulos utilizando la razón trigonométrica seno. En el diagrama de Huygens:

$$\text{sen}\,\alpha=\frac{\overline{AB}}{r}\ \text{y sen}\,\beta=\frac{\overline{CD}}{r}.$$

Así, la ley de Snell queda:

$$\frac{\text{sen}\,\alpha}{\text{sen}\,\beta}=1{,}52.$$

Esta igualdad proporciona el ángulo de salida para cualquier rayo incidente.

defectos de las lentes y descubrir sus configuraciones más ventajosas a través de un estudio teórico, que además explicase su funcionamiento. Por desgracia, le faltaba un recurso imprescindible para coronar con éxito la empresa. Hemos visto cómo la luz se desvía al pasar del aire al vidrio, pero ¿cuál es la relación exacta entre los ángulos de entrada y salida, α y β? La respuesta es una relación trigonométrica, la ley de Snell, que Kepler ignoraba en 1610, cuando completó su tratado *Dioptrice.*

«De entrada pulí mal la cara opuesta: fue debido a que apliqué demasiada agua al principio o no pulí donde debía. Logré corregirlo, hasta cierto punto, puliendo de nuevo en el lugar adecuado; después, al seguir puliéndolo, se volvió a estropear.»

— **Descripción de Huygens del pulido de lentes.**

Los dibujos de la sección anterior ilustraban un análisis cualitativo de la formación de imágenes. Sucede lo mismo en los diagramas que Kepler insertó en su *Dioptrice.* Los rayos de luz se tuercen al cruzar las lentes, pero ¿exactamente cuánto? Kepler solo pudo responder con las desviaciones medidas de forma experimental. Este procedimiento recortaba su ambición de elaborar una teoría general, porque para explorar cada una de las posibilidades haría falta que un artesano puliera lentes con todas las curvaturas imaginables. Para obtener resultados generales y especular a su antojo sobre cualquier configuración de rayos y lentes necesitaba la relación matemática exacta entre los ángulos de la refracción.

Aunque existen ciertas disputas al respecto, parece que Descartes dedujo la relación de Snell de forma independiente a finales de la década de 1620. Llegó a una ley que equilibra en una ecuación ángulos y rayos de luz, física y geometría, pero Descartes se decantó por su lado matemático. La aplicó en una serie de cálculos elegantes, para confeccionar una teoría casi platónica de cómo debían ser las lentes ideales de los telescopios, con perfiles hiperbólicos y elípticos, que eliminaban la aberración esférica. Incluso

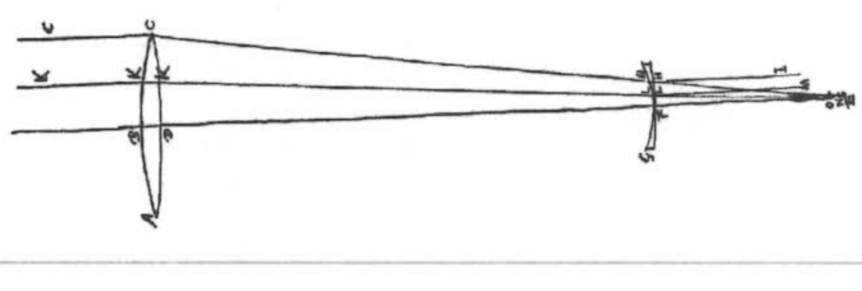
diseñó el torno que las produciría. Por desgracia, no hubo artesano capaz de tallar los cristales que exigía su imaginación. Con la tecnología de la época, las únicas lentes viables eran esféricas.

Huygens quiso hacer realidad el telescopio soñado por Descartes, pero a partir de los cristales que los artesanos sabían fabricar. Fue el primero en aplicar la ley de Snell para calcular con exactitud la distancia focal y los aumentos de cualquier lente esférica y determinar el tamaño, la ubicación y la orientación de sus imágenes. Así pudo plasmar sobre el papel el resultado de cualquier configuración de dos o más lentes que se le ocurriera, sin necesidad de manipularlas físicamente.

Conociendo la relación entre α y β para los cruces de frontera entre el aire y el vidrio, y la geometría de las lentes, cumplió la ambición de Kepler de reducir la dióptrica a un problema matemático. Después de sentar las bases de una teoría general del telescopio, introdujo las primeras mejoras premeditadas en el instrumento. Para un objetivo cualquiera calculó la curvatura de un ocular cóncavo que, ubicado a una distancia determinada, corregía por completo su aberración esférica (figura 16). Se trataba de un éxito parcial, porque este emparejamiento (un objetivo convexo y un ocular cóncavo) correspondía a un telescopio terrestre, como el que utilizó Galileo. A partir de los cincuenta aumentos, estos telescopios ofrecen un campo visual tan reducido que se vuelven inservibles para la observación astronómica.

Huygens completó en dos años el primer borrador de un tratado donde organizaba, a lo largo de un centenar de páginas y en

FIG. 16



una secuencia de proposiciones, su interpretación matemática de la dióptrica. Se pasaría el resto de su vida puliendo el manuscrito, como si se tratara de una lente a la que siempre encontraba defectos. Después de escribir la contribución más completa a la teoría de las lentes desde Kepler —y de aparcarla en un cajón de su escritorio—, consideró que había llegado el momento de pasar a la acción. Si no había quedado satisfecho con la teoría de Kepler y Descartes, menos le convenció la calidad de los instrumentos ópticos que pudo adquirir en el mercado. Las lentes que salían de los talleres se destinaban a lupas y gafas y distaban de cumplir las exigencias que demandaba la incipiente tecnología de los telescopios. Con la ayuda de su hermano Constantijn, en 1654 Huygens emprendió la tarea de pulir sus propios objetivos y oculares. No se había propuesto una empresa sencilla. En primer lugar, tuvo que lidiar con el secretismo de un gremio particularmente opaco. Una técnica novedosa permitía destacar a un artesano sobre los demás, así que el mejor modo de mantener una posición privilegiada era no compartir los descubrimientos. Algunos se los llevaron a la tumba. Fue el caso del célebre fabricante de telescopios francés Philippe-Claude Lebas. Ningún ruego fue capaz de arrancar a la viuda el secreto de su depurada técnica para pulir lentes.

A grandes rasgos, en la época de Huygens se partía de un trozo de vidrio cuajado en un molde. En esta etapa preliminar ya se introducían los primeros defectos ópticos. Las impurezas de hierro coloreaban el vidrio; las burbujas y la densidad irregular del material distorsionaban las imágenes. A la pieza se le daba forma de lente con ayuda de un torno, frotándola con polvos o sustancias abrasivas. El modelado en bruto suponía el proceso más trabajoso; el de pulido, el más delicado. Aunque Christiaan diseñó un torno especial para facilitar la tarea, con el tiempo fue dejando el grueso del trabajo en manos de los artesanos y se reservó el pulido final de los objetivos.

El contacto directo con las lentes y el trabajo en el taller añadió una nueva dimensión a su comprensión de la dióptrica. La práctica a veces produce resultados que uno no ha sabido leer en la teoría. Entre ellos destaca una combinación particularmente

EL FILÓSOFO ARTESANO



Retrato de Spinoza realizado por Franz Wulfhagen en 1664.

Para Bertrand Russell, Baruch Spinoza (1632-1677) fue «el más noble y el más amable de los grandes filósofos». Lejos de compartir esta opinión, la comunidad judía de Ámsterdam lo expulsó de su seno en el verano de 1656, para castigar «sus actos y opiniones perversas». Spinoza, que dos años después de la muerte de su padre había rehusado hacerse cargo del negocio familiar —una empresa dedicada a la importación y exportación—, se vio entonces abocado a una situación delicada. Sus etéreas incursiones en la ética o la teología necesitaban con urgencia de algún medio mundano para sostenerse. Halló el que mejor se acomodaba a su carácter en el tranquilo, paciente y solitario oficio del pulidor de lentes. Esta elección también procuró su muerte, ya que la inhalación del polvo de cristal agravó sus problemas respiratorios. En la primavera de 1663 se instaló en la villa de Voorburg, en la casa del pintor Daniel Tydeman, a un paseo de cinco minutos de Hofwijck, la casa de campo de los Huygens. En aquella época, Christiaan y Spinoza se vieron con frecuencia, discutieron sobre óptica y astronomía y compartieron el placer de criticar a Descartes. Huygens tenía en alta estima la habilidad manual de Spinoza, pero sentía poco aprecio por su filosofía. Quizá se pueda disculpar recordando el comentario de Leibniz de que Huygens «no mostraba gusto alguno por la metafísica». Por su parte, Spinoza admiraba la ciencia de Huygens, aunque mostraba ciertos reparos hacia su técnica de pulido: «Huygens ha estado y sigue estando absorto en el pulido de cristales dióptricos, y con ese motivo ha montado una máquina, bastante precisa, por cierto, con la que puede fabricar lentes ayudándose de un torno. No sé todavía qué pretende hacer con ella y, si he de ser sincero, tampoco me interesa demasiado. La experiencia me ha enseñado a pulir lentes esféricas a mano con más seguridad y perfección que ninguna máquina».

feliz de lentes: el «ocular de Huygens» (figura 17). Lo integran dos lentes, que se sincronizan para dilatar el campo visual y reducir tanto las aberraciones como las manchas producidas por las burbujas o las irregularidades del vidrio.

En marzo de 1655, después de más de un año de esfuerzos, Constantijn y Christiaan completaron el montaje de su primer telescopio, que medía 4 m de largo y proporcionaba 43 aumentos. Huygens lo estrenó en el desván de la casa familiar. Al caer la noche abrió las contraventanas de madera, acomodó el telescopio contra algún soporte (una escalera de mano, quizá) y lo apuntó al cielo. En el siglo XVII los astrónomos no tenían que huir de las ciudades, ya que no existía la contaminación lumínica. Las calles de La Haya carecían entonces de farolas, faros de coches o neones que se interpusieran entre Huygens y el universo.

Christiaan contempló primero el cuerpo celeste más inmediato, la Luna. Espoleado por las hazañas de Galileo, pronto escrutó las inmediaciones de Marte y Venus, a la caza de nuevos satélites. El primer boceto que se conserva de Saturno, salido de su mano, lleva la fecha del 25 de marzo de 1655. Esa misma noche advirtió la presencia de un punto brillante en la vecindad del planeta. Noche tras noche siguió su evolución. Pasados dieciséis días el punto había regresado a su posición inicial: se trataba de un satélite que había completado una órbita alrededor de Saturno. La suerte había jugado en favor de Huygens, porque hizo las observaciones en un momento en que el anillo estaba a punto de ocultarse, de modo que su brillo no apantallaba el entorno del planeta con un exceso de luz.

FIG. 17



Las ocho primeras lunas de Saturno se descubrieron en momentos análogos, en lo que se conoce como cruce del plano del anillo. Entonces el disco se muestra de canto y su amplia superficie no refleja la luz del Sol hacia la Tierra. Los cruces son breves y hay que aguardar unos catorce años a que se repitan. Sin embargo, no cabe atribuir todo el mérito a la suerte. Otros astrónomos habían localizado el mismo punto luminoso junto a Saturno cuando Huygens era un adolescente, pero lo habían tomado por una estrella. Huygens siguió con tenacidad su trayectoria en torno al planeta (registró hasta 68 ciclos a lo largo de cuatro años) para fijar con precisión la duración de su período. Más tarde recibiría el nombre de Titán. El joven Christiaan había estrenado su telescopio con el mayor descubrimiento astronómico desde Galileo.

En junio divulgó entre un escogido círculo de corresponsales un verso de los *Fastos* de Ovidio, con varias letras añadidas: *Admovere oculis distantia sidera nostris vvvvvvv ccc rr hnbqx* («Acercaron a nuestros ojos las estrellas remotas»). Quien supiera reordenar las letras, obtendría una frase menos poética, pero no menos sugerente: *Saturno luna sua circunducitur diebus sexdecim horis quatuor* («La luna de Saturno gira a su alrededor en dieciséis días y cuatro horas»). Huygens no comunicó la solución a su juego de palabras hasta casi un año después.

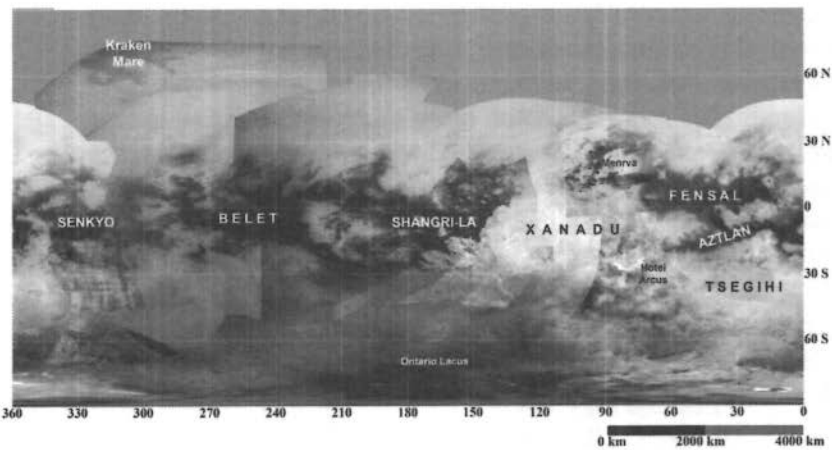
A principios de julio, tuvo que interrumpir sus observaciones para atender los requerimientos de su padre. Constantijn quería que se presentara en la Universidad de Angers para que se hiciera con el título de *doctor utriusque juris*, es decir, de «doctor en ambos derechos» (el civil y el canónico). Se trataba de un mero trámite. Huygens no tendría que malgastar más horas memorizando gruesos tratados de jurisprudencia, el diploma lo había comprado Constantijn al módico precio de 50 florines.

El joven aprovechó la excursión para disfrutar de una estancia de cuatro meses en París. La primera impresión que se llevó de la ciudad no figura en el catálogo de ninguna agencia de viajes. Al poco de instalarse, escribía a su hermano mayor:

> Todavía no he tenido tiempo de visitar ni a poetas ni a músicos, me he limitado a vagar con mis compañeros por las calles. Están llenas

EL PLANETA ENCUBIERTO

Christiaan Huygens nunca llamó Titán a la luna de Saturno que había descubierto. Fue el astrónomo inglés John Herschel (1792-1871) quien le dio su nombre definitivo. Titán supo estar a la altura del enigmático planeta que orbitaba. La obsesión antropocéntrica por la búsqueda de la vida consideró durante mucho tiempo los satélites como astros de segunda. La revelación de que Titán era el cuerpo del sistema solar con la atmósfera más densa después de la Tierra excitó la imaginación de los astrónomos. Alguno llegó a calificarlo de planeta enmascarado. Los escritores de ciencia ficción se atrevieron a materializar las fantasías de los científicos. Isaac Asimov, Robert A. Heinlein, Philip K. Dick, Kurt Vonnegut, Arthur C. Clarke o Stanislaw Lem poblaron la mayor luna de Saturno de robots y de un abigarrado bestiario de alienígenas. La realidad que nos transmitieron las sondas espaciales resultó más prosaica, pero no menos fascinante. Con la Tierra, Titán es el único cuerpo del sistema solar con masas líquidas estables sobre su superficie. Posee lagos y valles fluviales, en los que no circula el agua, sino hidrocarburos líquidos. El metano y el etano cambian de estado, se evaporan, se condensan en nubes y se precipitan en lluvias. Después de siete años de singladura espacial, un vehículo robot del tamaño de una lavadora, llamado Huygens, se separó de la sonda Cassini el día de Navidad de 2004. El 14 de enero se convertía en el ingenio humano que se posaba más lejos de nuestro planeta, al aterrizar en Titán.



Mapa de Titán compuesto con imágenes tomadas por la nave espacial Cassini, de la NASA, en el año 2009.

> de barro y apestan de un modo horroroso, ya que la gente vuelca sus orinales por las ventanas, sin más que avisar: «¡Agua va!» [...] Cuento con una habitación para mí solo, alfombrada casi de arriba abajo. En el ático hay ratas y ratones, que con frecuencia vienen a visitarme. Y también tengo chinches, que me incordian durante la noche, así que llevo la frente y las manos cubiertas de picaduras.

En una visita al castillo de Fontainebleau disfrutó lanzándoles migas de pan a las obesas carpas. Para distraerse del asedio nocturno de las chinches, su mente daba vueltas a un enigma que mantenía en jaque a los mejores astrónomos de Europa.

CAPÍTULO 2

El enigma de Saturno

Saturno dio origen a uno de los rompecabezas más desconcertantes del nuevo cosmos que progresivamente iba revelando el telescopio. Desde que en 1612 Galileo planteó el problema de las múltiples apariencias del planeta, la cuestión mantuvo en jaque a los astrónomos. Fue un joven Huygens quien, cuatro décadas después, ofreció una solución tan sencilla y elegante como inesperada.

Al final, no todo fueron ratas, chinches y sobresaltos en las callejuelas de París. Huygens terminó encontrando a los músicos y poetas que buscaba. Así resumió los motivos que le habían ofrecido sus acompañantes —entre los que figuraban su hermano pequeño Lodewijk y su primo Louis Doublet— para visitar la capital del reino de Francia:

> Uno declaró que había venido para aprender a comportarse en la buena sociedad; otro, para que le presentaran celebridades; un tercero, en cambio, se interesaba por los edificios elegantes y la última moda, y lo único que pretendía un cuarto era estar lejos de su casa. Después de mucho discutir, y de hacerlo acaloradamente, se decidió casi por unanimidad que, para todo lo que se gana estando aquí, no merece la pena recorrer una distancia tan larga.

El tono de la carta era humorístico y por eso no alegó un quinto motivo que compensaba con creces las molestias de un viaje de cerca de 500 km. Huygens aterrizó en el París del Grand Siècle en plena moda de los salones. Al tiempo que florecían las veladas literarias de Madame de Maintenon o Mademoiselle de Scudéry, la ciencia inspiraba sus propios cenáculos. Gracias a la intercesión de Constantijn, Christiaan fue introducido en los círculos de Claude Mylon y Habert de Montmor, que se convertirían

en el germen de instituciones científicas mejor organizadas y con más recursos, como la Real Academia de Ciencias francesa. En la Biblioteca Real, al abrigo de casi 20 000 volúmenes, Huygens tuvo ocasión de alternar con el poeta Jean Chapelain, los astrónomos Adrien Auzout e Ismaël Boulliau o Gilles de Roberval. Una constelación de mentes inquietas que se daban unos a otros el tratamiento que consideraban más noble: el de matemáticos.

No hace falta ningún gurú para concluir que el secreto de una próspera vida profesional es una buena agenda. Este dogma contemporáneo se hacía más cierto todavía en la comunidad científica del siglo XVII, cuando no existían revistas especializadas y la principal fuente de información era la correspondencia. Las relaciones personales adquirían entonces un valor incalculable. Permitían estar al día de los últimos descubrimientos y de las investigaciones en curso. Con frecuencia, los grandes tratados pasaban a limpio páginas que antes se habían entregado a la posta y habían recorrido media Europa a lomos de los caballos. En el intercambio entre sabios se corregían los errores, se compartían problemas y se sometían a prueba las ideas. Los encabezamientos y despedidas de estas cartas refieren infinidad de noticias, detallan envíos de obras para el destinatario o sus conocidos o solicitudes de libros que no se pueden adquirir de otro modo. Uno de los mejores ejemplos de la correspondencia como taller o *work in progress* se encuentra en las cartas que cruzaron Blaise Pascal y Pierre de Fermat. Compusieron a cuatro manos las bases del moderno cálculo de probabilidades, en una colaboración que tuvo su origen en el desafío a Pascal de Antoine Gombaud, que se había armado a sí mismo *caballero de la Mere*. Huygens tuvo conocimiento de él, casi con seguridad, durante su primera estancia en París. Su carácter, que lo atraía como un imán a los problemas (científicos), lo empeñó en su solución. Huygens redescubrió por su cuenta muchos resultados de Pascal y Fermat, añadiendo sus propias aportaciones y presentándolas conforme a su particular gusto y temperamento en *Del razonamiento en los juegos de azar*.

Constantijn abrió a su hijo todas las puertas que franquea la llave de la diplomacia. Si bien Huygens explotó a fondo su red de

EL FALSO CABALLERO Y EL JANSENISTA



Retrato de Blaise Pascal.

El matemático francés Siméon Denis Poisson (1781-1840) situaba el origen del cálculo de probabilidades en «un problema relativo a los juegos de azar, propuesto por un hombre de mundo a un austero jansenista». Esta pintoresca alianza alumbró una de las ramas de la matemática más pegadas a la tierra. El hombre de mundo era el caballero de Méré (más un apodo que un título, puesto que Antoine Gombaud era de origen noble pero no caballero). El austero jansenista respondía al nombre de Blaise Pascal. ¿Y el problema? Ha pasado a la historia como «el problema de los puntos». Se puede enunciar como sigue. Dos jugadores se enfrentan con las mismas probabilidades de ganar en un juego de azar. Antes de comenzar, aportan cantidades iguales de dinero, que se llevará el vencedor. Se acuerda que este sea el primero que gane un número determinado de partidas. En el caso de que un imprevisto obligue a interrumpir el juego, ¿qué procedimiento deben seguir los jugadores para repartirse el dinero del modo más justo?

Huygens entra en la partida

El caballero de Méré animó la investigación planteando más problemas relacionados, igual que hicieron Pascal y Fermat, y cuantos tuvieron noticia del asunto. Entre ellos se contaba un joven Huygens. ¿Cuál fue su aportación? Existe al respecto cierto debate. Nosotros aquí nos remitimos a sus propias palabras, tal como figuran en la carta a Van Schooten que encabeza *Del razonamiento en los juegos de azar*: «Es preciso declarar, por otra parte, con el fin de que nadie me atribuya el honor de la primera invención, que no me corresponde, que hace ya cierto tiempo que algunos de los más célebres matemáticos de toda Francia se han ocupado de este género de Cálculo. Pero estos sabios, aunque se pusieron a prueba proponiéndose muchas cuestiones difíciles de resolver, sin embargo han ocultado sus métodos. Por tanto, me he visto obligado a examinar y profundizar yo mismo en toda esta materia [...]». Huygens no postergó la publicación de la obra, como hizo en numerosas ocasiones, hasta perder el reconocimiento de la prioridad. Solo medió un año entre su estancia en París y la edición del libro, que envió a Van Schooten en mayo de 1656. Durante más de medio siglo se mantuvo como el único texto publicado sobre el cálculo de probabilidades. Cubrió así un vacío en la literatura, entre las tentativas parciales de Cardano y Galileo y el gran *Ars Conjectandi*, «El arte de hacer conjeturas», de Jakob Bernoulli, que vio la luz póstumamente en 1713.

contactos, a cambio tenía mucho que ofrecer. En París su descubrimiento de Titán causó sensación. Cuando Jean Chapelain le urgió a que lo diera a la imprenta, Huygens no se atrevió a llevarle la contraria, pero le reconcomía un escrúpulo que lo perseguiría a lo largo de su carrera científica: la convicción de que el trabajo no estaba terminado. ¿Qué tratado sobre Saturno se podía considerar completo si no desvelaba el misterio que envolvía sus desconcertantes apariciones?

LOS TRES ROSTROS DE SATURNO

El telescopio no solo ayudó a que se asentara un nuevo modelo cosmológico, introdujo también rompecabezas inesperados. El que planteó Saturno resistió el ataque de los astrónomos más brillantes durante casi medio siglo.

La publicación en marzo de 1610 del revolucionario *Sidereus nuncius* («El mensajero de las estrellas») no frenó la racha de descubrimientos de Galileo. Cuando Kepler recibió en agosto del mismo año otra carta suya, que contenía un anagrama, *Smaismrmilmepoetaleumibunenugttaviras*, no pudo resistir la curiosidad y aplicó todas sus energías a descifrarlo. ¿Qué nuevo prodigio habría hallado en el cielo? Galileo se había convertido en un cazador de satélites y Kepler había elaborado una teoría que atribuía dos a Marte. Reordenó una y otra vez las letras hasta que obtuvo una frase con sentido: *Salve umbistineum geminatum Martia proles* («Salve, ardientes gemelos, hijos de Marte»). ¿Galileo había localizado las dos lunas marcianas que buscaba Kepler? En realidad, el astrónomo alemán había hecho un poco de trampa y había dado la vuelta a una de las consonantes, la ene, para transformarla en la vocal que le faltaba, una u. La verdadera solución al anagrama era: *Altissimum planetam tergeminum observavi* («He visto al planeta más alto [Saturno] formado por tres cuerpos»). Saturno era el planeta menos brillante, el más alejado de cuantos se pueden percibir a ojo desnudo. Galileo se mostró menos reservado con Cosme II, Gran Duque de la Tos-

cana, y, en lugar de impacientarlo con mensajes codificados, le explicó llanamente lo que había visto:

> He descubierto otro prodigio de lo más singular, [...] la estrella de Saturno no es una estrella simple, se compone de tres, que casi se tocan [...], siendo la del centro tres veces más grande que las laterales, disponiéndose en la forma: oOo.

Galileo confiaba en que el aspecto de los tres cuerpos celestes variase con el curso de los días, puesto que los dos satélites tendrían que desplazarse en su órbita alrededor de Saturno. Para su asombro, mantuvieron una terca inmovilidad. En una nueva carta a Kepler, los caracterizó como «dos criados de este anciano [Saturno], que vigilan cada uno de sus pasos y nunca se apartan de su lado». Kepler concibió otra explicación para esta enigmática parálisis. No eran satélites, en realidad el planeta constaba de tres partes: «No tomaré a Saturno por un anciano, ni a las esferas que lo acompañan por sus esclavos; más bien, atribuiré esta forma tricorpórea a Gerión». Gerión era uno de los adversarios mitológicos a los que se enfrentó Hércules con ocasión de sus doce trabajos, un gigante monstruoso de tres cuerpos.

En vista de que la disposición del sistema no se inmutaba, la atención de Galileo se desvió al estudio de las manchas solares. Saturno aprovechó el despiste para ejecutar su primera mutación. Cuando, en un respiro, Galileo volvió a ocuparse de él, le deparó una sorpresa mayúscula:

> También contemplé los tres cuerpos de Saturno este año [1612], en torno al solsticio de verano. Después de haberlo perdido de vista durante más de dos meses, confiado en su constancia, al observarlo de nuevo hace unos días, lo hallé solo, sin el apoyo de sus planetas secundarios y, en suma, perfectamente redondo y tan claramente definido como Júpiter. ¿Qué se puede decir de tan extraña metamorfosis? ¿Quizá las dos estrellas más pequeñas se han consumido, como hacen las manchas solares? ¿Quizá se han dado a la fuga y se han desvanecido de pronto? ¿Quizá Saturno ha devorado a sus hijos?

En cuanto el caprichoso comportamiento de Saturno trascendió a la comunidad científica, surgieron por doquier infinidad de teorías para intentar esclarecerlo. Los primeros tanteos buscaron la respuesta en alguna configuración de satélites, puesto que en última instancia eran estos los elementos más fa-

LA CRIPTOGRAFÍA DE LOS ASTRÓNOMOS

Entre los astrónomos del siglo XVII se extendió una práctica curiosa para garantizar la prioridad sobre cualquier descubrimiento que todavía no considerasen maduro para su publicación. Lo resumían en una frase, alterando el orden de las letras hasta velar su significado, y la insertaban en una carta que hacían llegar a varios colegas de prestigio. El sistema funcionaba como un registro de la propiedad intelectual. Si las expectativas no resultaban fundadas, el rompecabezas se dejaba en su críptico limbo. En caso de confirmarse, sin embargo, se revelaba la solución, y la fecha de la carta original servía de referencia para fijar atribuciones. Galileo, un virtuoso de los juegos de palabras, construía anagramas. Es decir, tanto la frase en clave como su solución tenían sentido. Por ejemplo, en septiembre de 1610 incluyó en una carta a Kepler la siguiente línea: *Haec immatura a me iam frustra leguntur o. y.* («Leo en vano estas cosas, todavía inmaduras»). Al reordenar las letras se obtenía: *Cynthiae figuras aemulatur mater amorum* («La madre de Amor imita las figuras de Cinthia»). *Cintia* era un epíteto para referirse a la diosa de la Luna, que había nacido en el monte Cinto. La madre de Amor era Venus. Es decir: Venus presentaba fases, igual que la Luna. Conseguir dos enunciados con sentido resultaba laborioso. Huygens admiraba a Galileo pero nunca se entregó al juego de corazón. Para encriptar su descubrimiento de Titán recurrió a una cita de Ovidio, pero añadiendo las letras que le faltaban. En su siguiente anagrama se limitó a presentar una lista alfabética de las letras que componían el mensaje.

Errores afortunados

Kepler estaba dotado de un sexto sentido a la hora de malinterpretar los acertijos de Galileo. Ya hemos visto cómo creyó entender que había avistado dos satélites en torno a Marte. Aunque Galileo quería decir otra cosa, el planeta contaba, en efecto, con dos lunas, Fobos y Deimos, que no se encontraron hasta dos siglos después, en 1877. En el anagrama donde Galileo cifraba las fases de Venus, Kepler interpretó este mensaje: *Macula rufa in Jove est gyratur mathem, etc.* Es decir: «Hay una mancha roja en Júpiter que gira matem(áticamente)». Kepler amañó un poco la solución, porque añadió algunas letras que le faltaban y descartó otras. De todos modos tampoco acertó esta vez, lo que no quita que, en su error, tuviera razón de nuevo. La gran mancha roja de Júpiter no se observó hasta 1665.

miliares que los astrónomos podían situar en el cielo. Pero si se trataba de satélites, ¿qué peculiar dinámica los mantenía inmóviles durante meses para, sin previo aviso, ocultarlos? Daba la impresión de que Saturno pretendía embaucarlos con un truco de feria celeste.



SYSTEMA SATVR... 47

ea quam dixi annuli inclinatione, omnes mirabiles Saturni facies ſicut mox demonſtrabitur, eo referri poſſe inveni. Et hæc ea ipſa hypotheſis eſt quam anno 1656 die 25 Martij permixtis literis una cum obſervatione Saturniæ Lunæ edidimus.

Erant enim Literæ aaaaaaacccccdeeeeegh iiiiiiillllmm nnnnnnnnnoooo pp q rr stttttt uuuuu; quæ ſuis locis repoſitæ hoc ſignificant, *Annulo cingitur, tenui, plano, nuſquam cohærente, ad eclipticam inclinato.* Latitudinem vero ſpatij inter annulum globumque Saturni interjecti, æquare ipſius annuli latitudinem vel excedere etiam, figura Saturni ab aliis obſervata, certiuſque deinde quæ mihi ipſi conſpecta fuit, edocuit: maximamque item annuli diametrum eam circiter rationem habere ad diametrum Saturni quæ eſt 9 ad 4. Ut vera proinde forma ſit ejuſmodi qualem appoſito ſchemate adumbravimus.

Cæterum obiter hic iis reſpondendum cenſeo, quibus novum nimis ac fortaſſe abſonum videbitur, quod non tantum alicui cæleſtium corporum figuram ejuſmodi tribuam, cui ſimilis in nullo hactenus eorum deprehenſa eſt, cum contra pro certo creditum fuerit, ac veluti naturali ratione conſtitutum, ſolam iis ſphæricam convenire, ſed & quod annulum

Occurritur iis quæ de annulo objici poſſent.

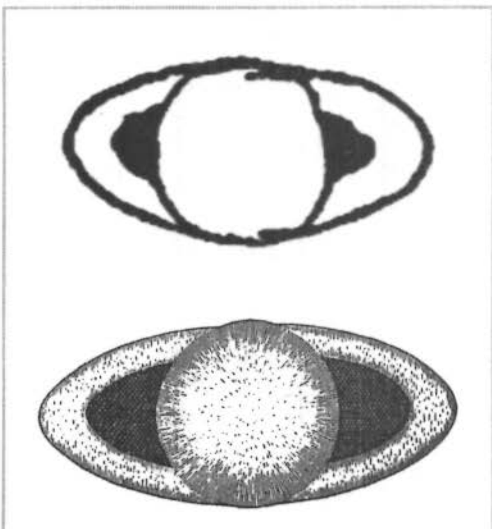
Página del *Systema Saturnium*, donde Huygens resuelve el anagrama sobre el anillo del planeta.

En el verano de 1616 Galileo enfocó de nuevo su telescopio hacia el planeta más distante, para comprobar cómo progresaba el ciclo de tres cuerpos a uno solo. No divisó ni una cosa ni la otra. Saturno presentaba ahora dos «asas» laterales, como un trofeo que alguien hubiera alzado hasta el firmamento. El esbozo en el que reflejó sus observaciones parece sugerir que había resuelto el misterio y que había dibujado un anillo. Una impresión que desmiente la detallada descripción que hizo al cardenal Federico Borromeo:

> [Los dos acompañantes de Saturno] ya no son dos esferas perfectas como antes, sino dos cuerpos mucho más grandes, que ya no son redondos, como se aprecia en la figura adjunta, es decir, dos medias elipses con dos pequeños triángulos oscuros en mitad de las figuras, que tocan la esfera central de Saturno, que se observa, como siempre, perfectamente redonda.

A lo largo de su vida Galileo recurrió a diversas expresiones para referirse a lo que había visto, como por ejemplo «mitras», pero siempre aludían a un par de apéndices. Observaciones posteriores, con telescopios mejores, parecían proporcionar, de nuevo, una respuesta evidente. Tómese como ejemplo el grabado que ejecutó el fabricante de telescopios italiano Eustachio Divini en 1649, en un momento en que la posición de Saturno exhibía con mayor claridad su anillo.

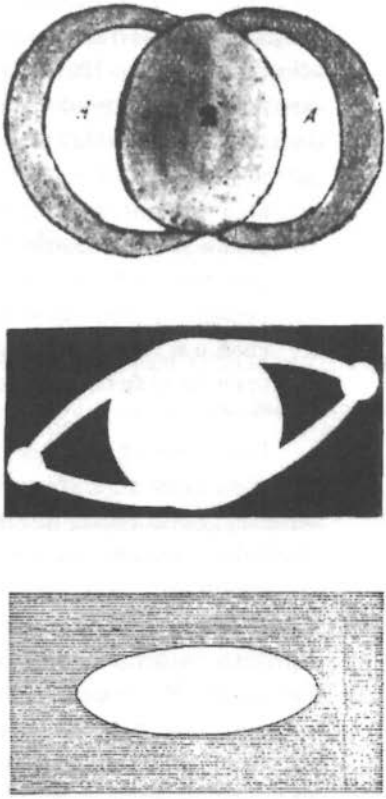
Dos dibujos de Saturno según Galileo (arriba) y según Divini.



Estos dibujos muestran que, a la hora de interpretar la información que recogen nuestros sentidos, el cerebro no se comporta como un juez imparcial. Las expectativas y los prejuicios juegan un papel determinante. Los astrónomos de las primeras décadas

PISTAS FALSAS

Saturno ostentaba el periodo orbital más largo conocido, de unos veintinueve años y medio. Después de que Galileo pusiera el problema encima de la mesa, se sucedieron varias décadas en las que los astrónomos ampliaron el registro de observaciones. Este proceso, imprescindible para apuntalar una hipótesis que se ajustara a los hechos, también introdujo pistas falsas, por culpa de la calidad muy dispar de las lentes —que no estaban sujetas a ningún estándar y dependían de la habilidad de cada artesano— y por la propia subjetividad de los observadores. El mismo Galileo ya advirtió que un telescopio podía mostrar una figura ovalada donde otro, de mayor resolución, revelaba las tres esferas. Algunas de las representaciones más imperfectas de Saturno contaban con el marchamo de un astrónomo de prestigio, luego la tarea de cribarlas no era sencilla.



Tres observaciones de Saturno: de arriba abajo, realizadas por Fontana (en 1638 y 1645) y Gassendi (en 1634).

del siglo XVII no veían un anillo alrededor de Saturno porque la escasa resolución de sus telescopios emborronaba la imagen y también porque nadie esperaba encontrar una figura semejante en el cielo. No existía ningún precedente astronómico. Nosotros sabemos que un disco rodea el ecuador de Saturno y, por tanto, en una imagen borrosa o en un bosquejo completamos las lagunas y «distinguimos» el anillo que esperamos ver.

Incluso reduciendo el problema a justificar las tres encarnaciones de Saturno mejor establecidas —la de un cuerpo aislado, la de tres cuerpos independientes y la de un cuerpo central con dos asas—, nadie lograba concebir un conjunto de masas que, al desplazarse, las fuera produciendo sucesivamente. En 1658, un año antes de que Huygens publicara su *Systema Saturnium*, el científico y arquitecto Christopher Wren resumía con cierto desaliento el estado de la cuestión:

> Solo Saturno se aparta de la norma del resto de cuerpos celestes y exhibe fases tan contradictorias que todavía hoy no se sabe si es una esfera en contacto con otras dos más pequeñas o un esferoide que dispone de dos conspicuas cavidades o, si así se prefiere, dos manchas, o si representa alguna clase de recipiente con asas a los lados, o, en fin, si se trata de otra forma cualquiera.

La primera hazaña de Huygens en relación con Saturno había sido descubrir algo normal en el más anómalo de los planetas: un satélite. ¿Sería capaz de desenredar la enervante paradoja de sus múltiples apariencias? En noviembre de 1655 salió de París de regreso a La Haya y se apresuró a reanudar sus observaciones astronómicas. Por desgracia, las «asas» estaban a punto de desaparecer y pronto Saturno le ofreció su rostro más hermético: una esfera despojada. En una carta fechada el 8 de febrero de 1656, sin embargo, presume de haber hallado la causa de todas las apariciones del planeta. Por tanto, resolvió el enigma a ciegas, en un momento en que el anillo no resultaba visible. Como ningún telescopio se lo podía mostrar, tuvo que recurrir a los ojos de la mente.

LA SOLUCIÓN DEL MISTERIO

A mediados de marzo de 1656 salía de la imprenta *De Saturni luna observatio nova* («Nuevas observaciones de una luna de Saturno»), que ya desde el título proclamaba el descubrimiento de Titán. En este opúsculo de dos páginas Huygens predecía que las asas reapa-

recerían en abril de ese mismo año. También anunciaba que había resuelto la paradoja de los tres rostros del planeta e invitaba al resto de científicos a presentar una explicación que pudiera rivalizar con la suya. En un nuevo anagrama escondía su propia solución: a a a a a a a c c c c c d e e e e e g h i i i i i i i l l l l m m n n n n n n n n n o o o o p p q r r s t t t t t u u u u u «para que en el caso de que alguien estime que encontró lo mismo que yo, tenga tiempo de darlo a conocer y así no se pueda decir que se apropió de una idea mía, ni que yo me apropié de la suya». Su desafío, secundado por el espectacular anuncio de Titán, reavivó el interés por un rompecabezas que había dejado fuera de combate al mismísimo Galileo.

> «Hasta el momento Saturno engaña a los astrónomos o, más bien, se burla de ellos, ya sea por odio o por malicia.»
>
> — Johann Georg Locher, estudiante de la Academia Jesuita de Ingolstadt.

A pesar de la expectación levantada, ningún astrónomo dio con la verdadera respuesta. Como en una vieja novela policial, después de escuchar las explicaciones insatisfactorias al misterio, llegó el turno de Huygens. Absorto en la construcción del primer reloj de péndulo, se hizo de rogar hasta el verano de 1659, momento en el que publicó su *Systema Saturnium*. En él se ofrecía la solución al anagrama: *Annulo cingitur, tenui, plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato* («Lo rodea un anillo plano y delgado, que no lo toca en ningún punto, inclinado respecto a la eclíptica»). La eclíptica es un punto de referencia astronómico que define el plano de la órbita terrestre.

Ya en sus primeras observaciones de marzo de 1655 Huygens había recogido una pista crucial. Aunque entonces las asas apenas fueran visibles, no se acortaban a medida que se hacían más finas. Esto le hizo sospechar que la diferencia entre los tres cuerpos o las asas no se debía al desplazamiento de ninguna masa en torno a Saturno. El grueso de su argumento se apoyaba en un paralelismo entre los sistemas Luna-Tierra y Titán-Saturno.

La Tierra invierte un día en su movimiento de rotación, mientras que la Luna tarda veintinueve días en completar una

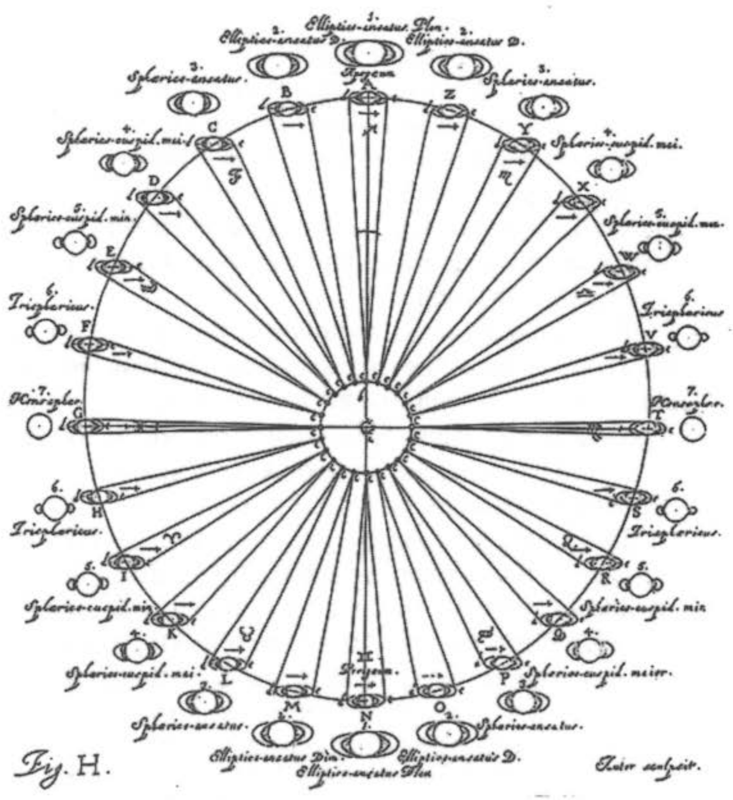
LAS RESPUESTAS AL DESAFÍO

El primero en recoger el guante arrojado por Huygens en *De Saturni luna observatio nova* fue el ilustre astrónomo polaco Johannes Hevelius. Propuso que el cuerpo de Saturno era un ovoide, al que se fijaban dos extensiones laterales en forma de luna creciente y luna menguante. El conjunto, de lado, ofrecía a la vista un contorno circular. Al rotar, tal como se muestra en la figura, se sucedían con facilidad las encarnaciones de la esfera aislada y el cuerpo con asas. ¿Qué ocurría con las tres esferas que había distinguido Galileo? Según Hevelius se podían descartar como una mera ilusión: «Admitimos, por consiguiente, que aunque las esferas adyacentes a Saturno de hecho nos parezcan redondas, de todos modos no lo son en absoluto». Una paradoja que no convenció a quienes pasaban las horas de la noche con la mirada fija en el planeta y, por mucho que se frotaran los ojos, no dejaban de encontrar los viejos sirvientes de Saturno tan redondos como su amo.

Tan lejos, tan cerca

Otras teorías, como la del jesuita alemán Christoph Scheiner, lograban justificar la aparición de las tres esferas o de una solitaria, pero recurrían a argumentos bastante forzados para las asas. El matemático francés Gilles de Roberval concibió una de las teorías más ingeniosas. Para explicar la sorprendente plasticidad de Saturno recurrió a una materia más dúctil que la que compone los planetas y satélites. Del ecuador de Saturno surgirían chorros de vapor que solo resultaban visibles a medida que se iban espesando. En los momentos en los que una densa nube se concentraba en torno al ecuador, de lejos el conjunto adquiría el aspecto de un elipsoide. Al irse disipando las tinieblas en torno a la cintura del planeta, se abrían los huecos que dibujaban el perfil de las asas. Entre esta sucesión de tanteos, el arquitecto inglés Christopher Wren casi dio en la diana. Propuso que una corona muy delgada, en forma de elipse, rodeaba a Saturno y lo cortaba en dos puntos del ecuador.

vuelta alrededor de nuestro planeta. Huygens extrapoló esta diferencia de tiempos y consideró que la rotación de Saturno en torno a su eje también debía ser mucho más breve que el período de su satélite. Si Titán tardaba dieciséis días en dar una vuelta alrededor de Saturno, este debía demorarse solo unas trece horas en girar sobre sí mismo. Cualquier porción de materia situada en el espacio entre el planeta y el satélite giraría en una órbita de período intermedio.



Por tanto, la masa que acompañaba a Saturno, al margen de qué forma adoptase, tenía que desplazarse a su alrededor en ciclos periódicos que durasen menos de dieciséis días. Sin embargo, el planeta tardaba mucho más en completar sus mutaciones conocidas: unos catorce años. Huygens se convenció entonces de que si Saturno giraba como una peonza ante sus ojos cada noche, sin que fuera capaz de percibir ningún cambio en las asas, su masa debía de repartirse simétricamente alrededor del eje de rotación.

Resulta fácil detectar el giro de un cuerpo asimétrico, como la mano de una persona. Por contra, el contorno de una esfera o de un cilindro sin marcas en su superficie no ofrece ningún indicio sobre si gira o permanece inmóvil.

Entre las figuras que presentan simetría rotacional, la que mejor cuadraba con la imagen borrosa de las asas era un anillo. Quedaba una dificultad por vencer. Si el anillo solo invertía unas horas en girar con un movimiento simétrico que los telescopios terrestres no detectaban, ¿a qué obedecían las mutaciones que se producían cada catorce años? La respuesta había que buscarla en la inclinación del anillo.

El plano que contiene al anillo de Saturno forma un ángulo de 26,73° con el plano de su órbita (figura 1), un ángulo muy parecido al que forma el ecuador de la Tierra con su plano orbital (23,44°). Visto con lentes de diversa calidad y resolución, un simple anillo sesgado podía justificar la mayoría de las figuras que habían registrado los astrónomos.

Quedaba por explicar en qué orden se sucedían las figuras y la desaparición regular del anillo. El Sol ofrece una perspectiva privilegiada para hacerlo. Para nuestra estrella, Saturno muestra un comportamiento orbital similar a la Tierra, aunque describa una curva mucho más amplia. El eje de rotación de ambos plane-

FIG. 1

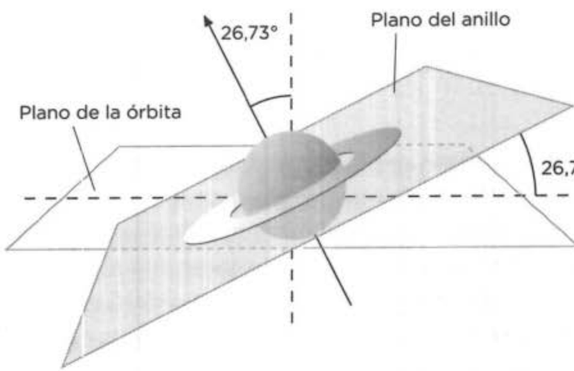
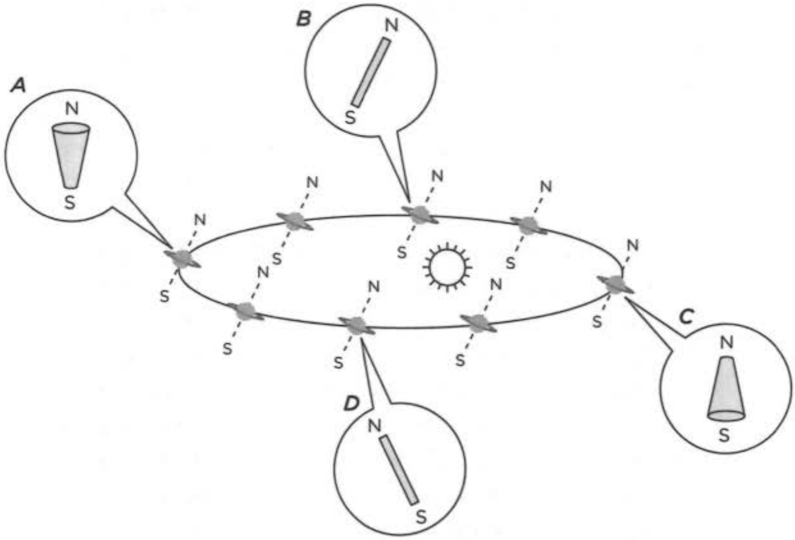


FIG. 2

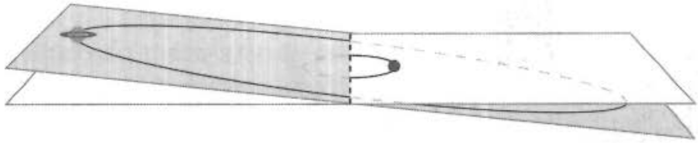


tas se inclina en un ángulo que se mantiene constante a lo largo de la trayectoria.

Esto hace que, para un habitante del Sol, el eje a veces se muestre con el polo norte echado hacia delante; otras, hacia atrás, y otras, de costado (figura 2). La misma circunstancia motiva el paso de las estaciones terrestres. La inclinación del eje también depara a Saturno sus inviernos y veranos, primaveras y otoños. A causa de las diversas inclinaciones, los habitantes del Sol verían el anillo desde abajo en la posición *C*; lo observarían desde arriba en la posición *A*. En las posiciones *B* y *D*, un anillo muy fino visto de canto resultaría invisible.

Dada la enorme distancia que separa a Saturno del Sol y la Tierra, desde su punto de vista están prácticamente juntos. Por tanto, en líneas generales, lo que vale para un habitante del Sol vale también para uno terrestre. Con todo, la equivalencia no es completa. En primer lugar, como ya sabemos, el eje de rotación de la Tierra también está ladeado. Se puede considerar casi paralelo

FIG. 3



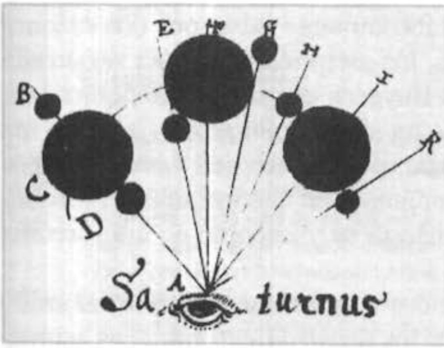
al de Saturno, así que apreciamos un grado de inclinación mucho menor. En segundo lugar, los planos que contienen las órbitas de la Tierra y de Saturno no coinciden, lo que nos sitúa a veces «por encima» de Saturno y otras, «por debajo» (figura 3).

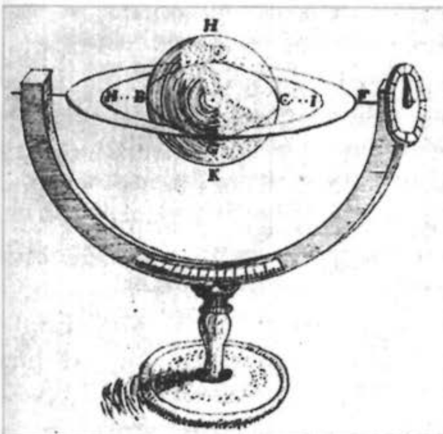
Todos estos efectos, sumados a la escasa resolución de los telescopios, dan cuenta de las mutaciones de Saturno. Huygens insertó al final del *Systema Saturnium* un diagrama que ilustra con maestría su hipótesis (se muestra en la página 67). Un miope podría ver las apariciones que faltan, como los tres cuerpos, las asas de Galileo o el huevo tumbado con manchas, contemplando los dibujos sin gafas.

LA RESACA DEL TRIUNFO

A pesar de que Huygens había desentrañado el enigma de las apariciones de Saturno mediante una cadena de razonamientos, atribuyó su éxito a la superioridad técnica de su telescopio:

> En esta investigación solicitamos que se nos conceda que, puesto que fuimos los primeros en detectar con nuestros telescopios al compañero de Saturno, y también en verlo con claridad siempre que así lo deseamos, nuestros telescopios se consideren superiores a los de aquellos que, a pesar de observar a Saturno a diario, fueron sin embargo incapaces de dar con la estrella [Titán]; y que por la misma razón los resultados de nuestras observaciones acerca de la forma del planeta se juzguen más fidedignos, en todos los casos en que las diferentes apariencias fueron observadas por nosotros y por ellos.



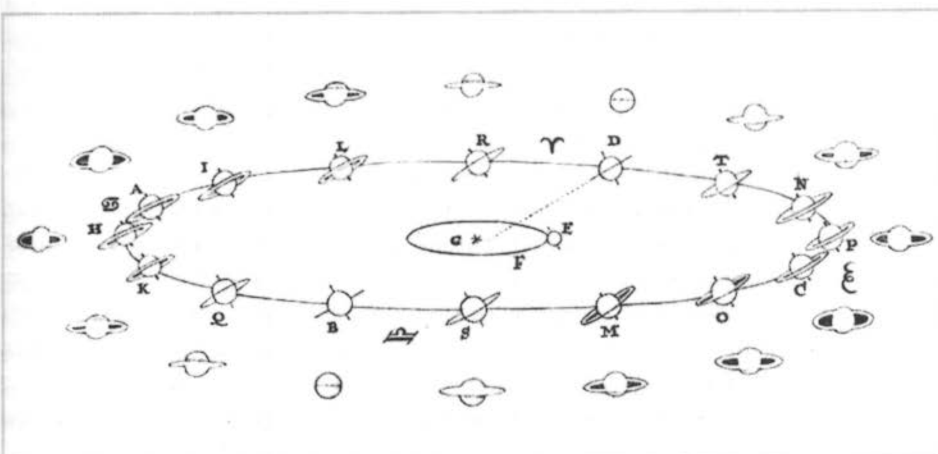




FOTOS SUPERIORES IZQUIERDA:
Diagrama del modelo de Christoph Scheiner, en su *Tractatus de Tubo Optico* (arriba), y maqueta del de Christopher Wren reproducida en su *De Corpore Saturni*.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Grabado dedicado a Huygens.

FOTO INFERIOR:
Esquema de Huygens que describe el ciclo completo de las apariciones de Saturno. Desde la perspectiva terrestre, el anillo a veces se observa desde arriba, otras, desde abajo. Entre medias, se muestra de canto, momento en el que «desaparece».

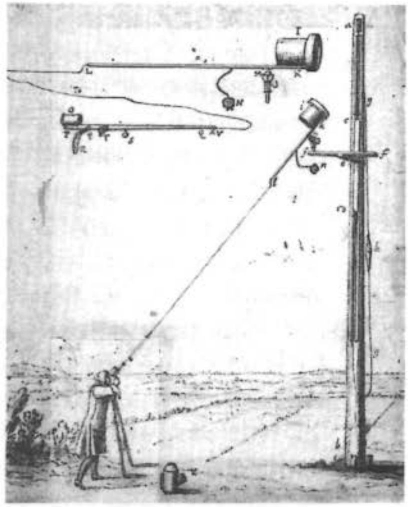


Esta pretensión era manifiestamente falsa, por dos razones como mínimo. Para empezar, los astrónomos habían registrado la presencia de Titán cuando Huygens era un niño, aunque no reconocieran que se trataba de un satélite. Su acierto aquí no fue instrumental. En segundo lugar, por irónico que fuera, Huygens resolvió el problema en un momento en que los anillos no resultaban visibles y, por tanto, cuando su telescopio no interpretaba papel alguno.

¿Por qué se marcó entonces el farol? La hipótesis del anillo descansaba en gran medida en los registros astronómicos acumulados a lo largo de cuatro décadas. Huygens tuvo que descartar muchas de las observaciones, que atribuía con razón a la imperfección de las lentes ajenas. Sin embargo, las habían publicado astrónomos de renombre y con más experiencia que él. Trató de imponer la autoridad que necesitaba a través de la superioridad de su telescopio, que parecía avalar el descubrimiento de Titán. La estrategia no alcanzó el éxito esperado. Muchas de las suspicacias que despertó su hipótesis del anillo no respondían a motivos científicos sino al amor propio. Procedían de astrónomos y artesanos cuyo prestigio y cuyo sustento dependían de la calidad de sus instrumentos. Fue el caso de Divini, considerado por muchos como el mejor fabricante de telescopios de Europa, y de Johannes Hevelius. Divini puso en tela de juicio las observaciones de Huygens, atribuyéndolas a defectos ópticos. Llegó a comentar con sorna que le hubiera ido mejor de haber comprado uno de sus instrumentos. Hevelius reaccionó airado: «¿Acaso supone Huygens que yo, u otros, somos incapaces de distinguir entre lo esférico y lo elíptico, o que [lo que vi] fue una invención de mi mente... o quizá que lo soñé? ¡No, por Hércules!».

Huygens dio con la geometría correcta del anillo, pero no con su estructura. En su opinión se trataba de un disco sólido, continuo y de un grosor apreciable. ¿Cómo si no podía arrojar una sombra sobre la superficie del planeta? Hasta el final de su vida le atribuyó una sección de casi 4000 km. Cuando le plantearon cómo el canto de un aro de ese calibre podía desvanecerse bajo la iluminación directa del Sol, Huygens arguyó que estaba formado por un material absorbente que no reflejaba la luz. Christopher Wren, que

SUPERTELESCOPIOS



Diseño de uno de los «telescopios aéreos» de Huygens.

Los grandes telescopios no constituyen una prerrogativa del siglo xx. Cuanto menos pronunciada sea la curvatura de una lente esférica, menos patente se hace la aberración cromática. Ya hemos visto que al rebajar la curvatura, los rayos de luz se desvían menos y más lejos cae el foco de la lente. Por esta razón, los fabricantes de telescopios enseguida trataron de conseguir grandes distancias focales, lo que implicaba separar, en la medida de lo posible, el objetivo del ocular. Se inició así la carrera por montar telescopios cada vez más largos. La resistencia y la manejabilidad de los tubos parecían, sin embargo, imponer un límite. Si descansaban en un solo apoyo, terminaban por doblarse o se partían con facilidad, y se mostraban extremadamente sensibles a los golpes de viento. Huygens cortó el nudo gordiano eliminando el tubo. En la imagen puede apreciarse el diseño de uno de sus «telescopios aéreos». El objetivo y el ocular se encajan en dos cilindros cortos de metal, unidos por una cuerda tensa. La altura del poste donde se sitúa el objetivo se podía ajustar tirando de una cuerda. La pieza que sostiene en alto la lente se mantiene estable mediante un contrapeso. De noche, Huygens se servía de una linterna para localizar la posición del objetivo, buscando el reflejo de la luz en el cristal.

había imaginado una teoría incorrecta, sí supo dar en cambio con la razón de su invisibilidad: el disco es tan delgado que «no ofrece grosor suficiente para que lo puedan apreciar los habitantes de la Tierra y por este motivo la corona [el anillo] se puede considerar como una mera superficie».

Siguiendo las huellas de su admirado Galileo, Huygens dedicó el *Systema Saturnium* a un distinguido miembro de la familia Médici, en su caso a Leopoldo, hijo de Cosme II. Lo último que

se podía esperar era que el príncipe italiano le diera la callada por respuesta. Un desaire que no obedeció a la falta de cortesía: Huygens acababa de ponerle en un brete. El *Saturnium*, como en su día el *Sidereus*, pertenecía a un género literario (el ensayo heliocéntrico) que levantaba escasas pasiones en el Vaticano. Leopoldo tenía su corte en Florencia, que caía mucho más cerca de Roma que el domicilio de Huygens en La Haya. Aunque la Iglesia no hubiera adoptado una postura oficial en contra del anillo, un jesuita influyente, Honoré Fabri, había desarrollado una solución alternativa dentro de un marco geocéntrico. Contaba con la colaboración de Eustachio Divini, molesto con Huygens por haber cuestionado la supremacía de sus telescopios. Ambos redactaron un tratado que enmendaba la plana al holandés desde la cubierta (se titulaba *Brevis annotatio in Systema Saturnium*) y que dedicaron a Leopoldo de Médici. Como cabía esperar, la teoría de Fabri ofrecía un perfil conservador y recurría a un juego de satélites. En su primera versión, cuatro lunas acompañaban a Saturno, dos pequeñas, opacas, y dos medianas, reflectantes. No orbitaban en torno al planeta, sino alrededor de puntos situados a su espalda. Para explicar las observaciones conocidas ejecutaban toda suerte de malabarismos orbitales que hubieran dejado sin aliento a Ptolomeo. En el proceso de superar algunas objeciones de Huygens, Fabri añadió dos satélites más.

Así, Leopoldo se vio en un fuego cruzado de dedicatorias. La de Fabri acompañaba una teoría alambicada y geocéntrica, que defendía un respetable miembro de la Iglesia; la de Huygens servía de preámbulo a una sobria y sugestiva propuesta copernicana, que desprendía un sospechoso tufo calvinista, ya que procedía de Holanda. Si bien Huygens apelaba solo al rigor de sus observaciones y razonamientos, los italianos desplegaron otras técnicas de persuasión: su teoría estaba de acuerdo con las Sagradas Escrituras y con la doctrina de la Iglesia. En el texto de Fabri, además, se hacían veladas alusiones al proceso de Galileo. El príncipe salió del apuro sacando partido de su patrocinio de las ciencias. Para algo se había molestado en fundar una de las primeras sociedades científicas de Europa, la Accademia del Cimento. Dejó, pues, que fueran los expertos quienes se mancharan las manos.

Cumpliendo las órdenes de Leopoldo y haciendo honor a su propio nombre (en italiano el verbo *cimentare* significa «poner a prueba»), la Accademia constituyó una comisión para examinar las dos alternativas. Construyeron una maqueta a escala de cada modelo, el de Huygens y el de Fabri, y los estudiaron desde largas distancias con telescopios de diversa resolución. Para no dejarse influir por ideas preconcebidas, encargaron a personas ajenas al experimento que describieran qué figuras observaban. El modelo de Fabri solo reflejó con acierto las apariciones solitaria y de tres cuerpos, dando lugar a configuraciones que no se apreciaban en el firmamento. El modelo de Huygens tropezó con un único escollo. Por más que untaron el borde exterior del anillo con una infinidad de sustancias absorbentes, se resistía a desaparecer cuando lo iluminaban con un falso Sol. Solo al hacer el disco muy fino se ocultaba a la vista, puesto de canto. Así, un sencillo modelo mecánico daba la razón a Wren. Precisamente porque la prueba se saldó a favor de Huygens, la Accademia del Cimento nunca hizo públicas sus conclusiones.

> «Un hombre que opine como Copérnico, que esta Tierra nuestra es un planeta conducido alrededor del Sol y alumbrado por él como los demás, no podrá evitar que le asalte alguna vez la fantasía [...] de que el resto de los planetas tienen su propio vestido y su mobiliario, incluso unos habitantes, al igual que esta Tierra nuestra.»
>
> — CHRISTIAAN HUYGENS.

Con pequeños ajustes a su modelo, Huygens consiguió predecir las siguientes mutaciones de Saturno con una exactitud sin precedentes. Hasta Fabri terminó reculando. Antes de hacerlo tuvo la generosidad de reconocer que después de leer el *Systema Saturnium* le costaba no ver un anillo cada vez que observaba a Saturno. Al ampliar el campo de las expectativas visuales, la obra de Huygens facilitó que la mente humana distinguiera por fin anillos en el firmamento. Divini fue menos receptivo y se negó a aceptar

el anillo hasta que lo contempló con sus propios ojos, a través de un telescopio fabricado por su hermano.

El *Systema Saturnium* se puede considerar como una digna continuación del *Sidereus nuncius* de Galileo. A pesar de lo que el título pudiera sugerir, no se circunscribe a Saturno. Huygens fue el primero en apreciar rasgos en la superficie de Marte. Al seguir el desplazamiento de la mancha de Syrtis Major —una extensa región de roca volcánica—, advirtió que el planeta rotaba alrededor de un eje y pudo establecer la duración del día marciano. También aportó nuevas observaciones de Júpiter y de la nebulosa de Orión, donde distinguió tres de las estrellas que forman en su centro el cúmulo del Trapecio. Describió la nebulosa como «una

HACIA UN TELESCOPIO MEJOR

Dado que el objetivo proyecta una imagen en el interior del telescopio, esta se puede manipular antes de que la amplíe el ocular. Huygens aprovechó esta circunstancia para introducir dos importantes mejoras en el instrumento. Galileo ya se había percatado de que al tapar con un disco de papel el borde del objetivo (donde se acumulaban los defectos de manufactura y de la aberración esférica) se obtenía una imagen menos luminosa, pero más definida. Dedujo las dimensiones óptimas del disco a base de pruebas. Huygens las calculó matemáticamente y, además, descubrió la ventaja de insertar el disco no en el objetivo directamente, sino en la imagen que genera. De esta forma también se corregía en parte la aberración cromática.

El micrómetro

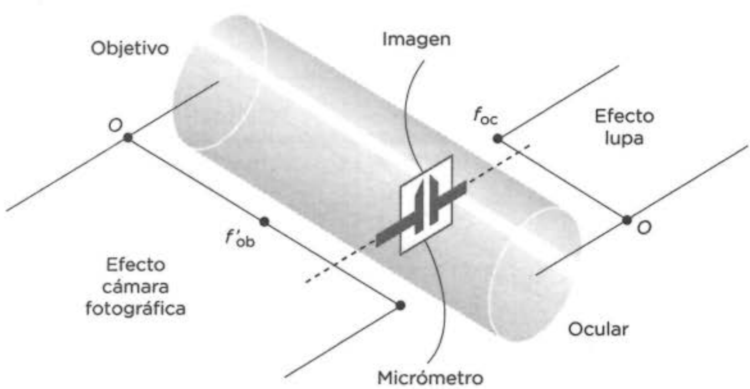
En los primeros años de la década de 1640, el astrónomo aficionado William Gascoigne quedó perplejo ante un misterioso filamento que cruzaba el campo de visión de su telescopio. Se perfilaba con absoluta nitidez, pero al alzar la vista del ocular se desvanecía en el espacio que se abría delante de él. Una inspección más atenta reveló que una araña había tejido su tela justo en el plano donde el objetivo proyectaba la imagen. El ocular había aumentado hilo e imagen a la vez, fundiéndolos. A partir de este afortunado accidente, a Gascoigne se le ocurrió sustituir la tela de araña por un dispositivo con dos barras verticales, separadas por una distancia graduable (véase la imagen). Con él podía realizar medidas sobre las imágenes que mostraba el telescopio. Acababa de inventar el micrómetro. Huygens concibió un mecanismo similar.

grieta en el cielo, que permite atisbar una región más luminosa en lo profundo». El *Systema Saturnium* también contiene una asombrosa estimación de las dimensiones del sistema solar.

LA GRANDEZA DEL MUNDO

El monumental trabajo astronómico de Copérnico y Kepler permitió cartografiar con bastante exactitud los dominios del Sol y de los seis planetas entonces conocidos: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Las proporciones del mapa que trazaron

Para hacerlo no necesitó el concurso de ninguna araña: le bastó su profundo conocimiento de la dióptrica. El micrómetro convirtió el telescopio en un instrumento de precisión. Hasta entonces los astrónomos solo ofrecían estimaciones subjetivas sobre los tamaños de los cuerpos celestes y los valores variaban demasiado de un autor a otro. El micrómetro proporcionó un patrón. William Gascoigne murió en la batalla de Marston Moor, durante la guerra civil inglesa, antes de que pudiera divulgar su hallazgo. Fue la descripción que hizo Huygens de su micrómetro en el *Systema Saturnium* la que lo dio a conocer y lo incorporó a la práctica astronómica.



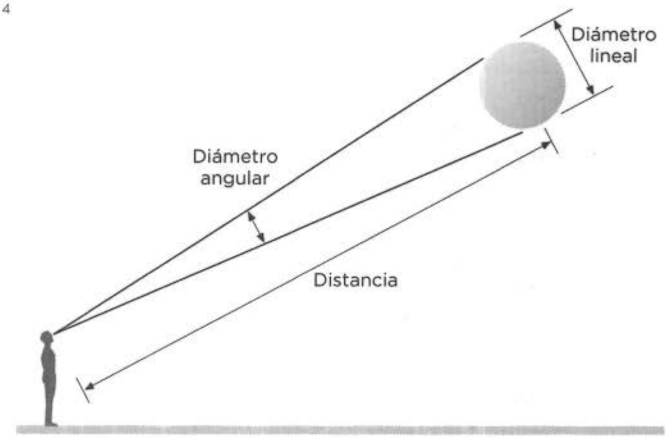
eran correctas, pero no supieron definir la escala. Todas las longitudes quedaban expresadas en función de una incógnita, la distancia entre el Sol y la Tierra, que, según Huygens, los astrónomos no habían logrado despejar de un modo satisfactorio:

> [...] a la hora de estimar la distancia entre la Tierra y el Sol difieren mucho unos de otros, lo que no es de extrañar, ya que todavía no se ha encontrado un método aceptable de medir dicha distancia. Ya traten de determinarla mediante eclipses o dicotomías de la Luna, resulta fácil demostrar que sus esfuerzos son en vano.

¿Qué hacer entonces? Huygens ensayó un ataque oblicuo a la cuestión. Sirviéndose de su micrómetro, calculó el diámetro angular de los planetas. Esta magnitud corresponde al ángulo desparejado de un triángulo isósceles, cuyos lados iguales son las distancias desde el observador a los extremos del planeta. El tercer lado lo forma su diámetro. Con más sencillez, se puede definir como la apertura de una pinza imaginaria con la que el observador sujetara el cuerpo celeste (figura 4).

Huygens comenzó con Saturno, para el que obtuvo un diámetro angular de 68''. Consultando el mapa sin escalas del sis-

FIG. 4



tema solar, comprobó que la distancia más corta entre Saturno y la Tierra equivalía a ocho veces la distancia media que nos separa del Sol. Dedujo entonces que si sacáramos a Saturno de su órbita y lo colocáramos junto al Sol lo veríamos ocho veces más grande. Este cambio de ubicación también multiplicaría por 8 el diámetro angular que había medido: 68'' · 8 = 544'' = 9' 4''. Desde la Tierra, el diámetro angular del Sol es 30' 30''. Con estos dos valores, uno real (el del Sol) y otro ficticio (el de Saturno desplazado), que corresponden a los ángulos que se medirían para la estrella y el planeta alejados a la misma distancia, pudo comparar sus tamaños:

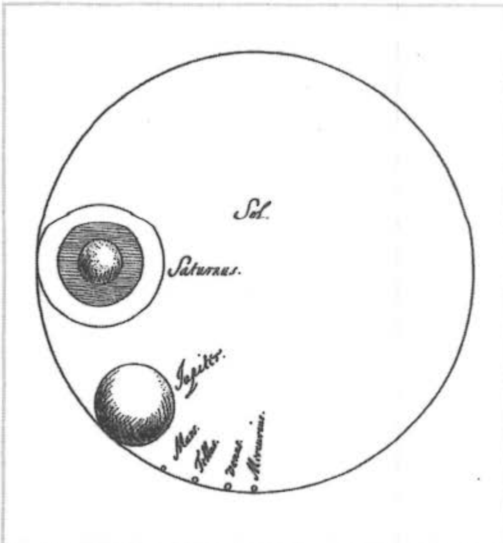
$$\left.\begin{aligned}\alpha_{Sat} &= 9'4'' = 9 \cdot 60'' + 4'' = 544'' \\ \alpha_{Sol} &= 30'30'' = 30 \cdot 60'' + 30'' = 1\,830''\end{aligned}\right\} \frac{\alpha_{Sat}}{\alpha_{Sol}} = \frac{544''}{1\,830''} \cong \frac{11}{37}.$$

Teniendo en cuenta que para ángulos pequeños y cuerpos situados a la misma distancia, la relación entre los diámetros lineales es la misma que entre los angulares, concluyó que el diámetro de Saturno era 11/37 veces el diámetro del Sol. En sus cálculos había incorporado el anillo; después de descontarlo la fracción se redujo a 5/37. Realizó las mismas operaciones con Venus, Marte y Júpiter:

D_{Sol}	1
D_{Venus}	$\frac{1}{84}$
D_{Marte}	$\frac{1}{166}$
$D_{Júpiter}$	$\frac{2}{11}$
$D_{Saturno}$	$\frac{5}{37}$

No incluyó valores de Mercurio porque las condiciones de observación no se lo permitieron.

Esta secuencia contradecía la creencia arraigada de que el volumen de los planetas crecía con la distancia al Sol y que, por



En el *Systema Saturnium* Huygens reflejó los tamaños relativos del Sol y los planetas en un gráfico innovador.

tanto, Venus debía ser mayor que Mercurio; la Tierra, mayor que Venus, y así sucesivamente. De nuevo, se trata de tamaños relativos, expresados en relación con el diámetro del Sol, cuyas dimensiones absolutas se ignoraban. Seguía faltando el factor de la escala. Huygens había llegado demasiado lejos ahora para detenerse. El precio por continuar adelante fue recurrir a un razonamiento algo caprichoso:

> Con el fin de conservar la armonía de todo el sistema en la medida de lo posible, parece que, después de todo, resulta de lo más razonable admitir que, puesto que la Tierra se encuentra situada entre Marte y Venus en lo que respecta a las distancias, también ocupe una posición intermedia con relación a los tamaños. Hemos dicho que el diámetro de Marte es 1/166 el diámetro del Sol, y que el de Venus, 1/84. Por tanto, si tomamos para el diámetro de la Tierra la media de estos dos diámetros, hallamos que corresponde a 1/111 el del Sol.

$$D_{\text{Ven}} = \frac{1}{84} D_{\text{Sol}}. \quad D_{\text{Mar}} = \frac{1}{166} D_{\text{Sol}}. \quad \text{La media: } \frac{\frac{1}{84}+\frac{1}{166}}{2} \cong \frac{1}{111}.$$

$$\text{Luego } D_{\text{Tie}} = \frac{1}{111} D_{\text{Sol}}.$$

Al recurrir a «la armonía de todo el sistema» estaba abandonando el terreno de la demostración científica, para perderse en una conjetura. Él mismo reconocía que a partir de aquí sus argumentos descansaban «sobre una base resbaladiza». Apoyándose en ella obtuvo que el diámetro del Sol era 111 veces el de la Tierra. Se trata de una excelente aproximación. Según los cálculos actua-

LA ESCALA DEL SISTEMA SOLAR

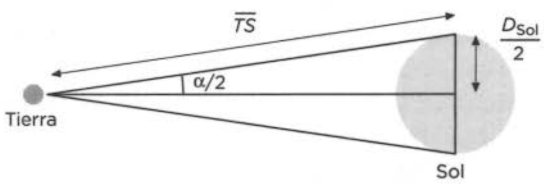
Huygens había determinado los tamaños relativos de los planetas con respecto al Sol. Con la ecuación $D_{Sol} = 111 \cdot D_{Tie}$, que ligaba el diámetro de nuestra estrella con el diámetro de la Tierra, pudo transformarlos en tamaños absolutos. Para comprender por qué esta relación encerraba la clave para llevar a cabo la misma operación con las distancias, aplicamos el esquema del diámetro angular, que aparece en la página 74, a un observador terrestre que contempla al Sol. A partir de la imagen, vemos que una sencilla igualdad trigonométrica relaciona $\overline{TS}$ (la distancia de la Tierra al Sol) con α y con D_{Sol}.

$$\operatorname{sen}\frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{D_{Sol}}{2}}{\overline{TS}}, \quad \overline{TS} = \frac{D_{Sol}}{2\operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Introduciendo el valor $\alpha = 30' \, 30''$: $\overline{TS} = 113 \cdot D_{Sol}$. Apelando a la armonía celeste, Huygens había logrado establecer que $D_{Sol} = 111 \cdot D_{Tie}$. Luego:

$$\overline{TS} = 113 \cdot D_{Sol} = 113 \cdot 111 \cdot D_{Tie} = 12543 \cdot D_{Tie}.$$

Como el radio de la Tierra se había estimado con suficiente exactitud, esta última ecuación proporciona el factor de escala buscado para el mapa del sistema solar de Kepler y Copérnico: la distancia entre el Sol y la Tierra.



les la cifra correcta es 109. En los tiempos de Huygens se contaba ya con una medida bastante aceptable del diámetro terrestre. Este valor le permitió transformar todas las distancias y tamaños relativos en absolutos y fijar la escala, expandiendo el sistema solar hasta sus colosales dimensiones.

En sus cálculos intervino la suerte, equilibrando varios errores que se cancelaron entre sí. La aberración cromática dispersa el contorno de los cuerpos celestes, dilatando su diámetro angular. Un exceso que se compensa al atribuir a la Tierra un tamaño más pequeño del que le corresponde, ya que es más grande que Marte y que Venus. Pero no deja de resultar impresionante lo certero del resultado.

Huygens también se permitió algún tic medieval, como otros fundadores de la ciencia moderna. Kepler entrevió una suerte de muñeca rusa de figuras geométricas para el sistema solar, donde las órbitas de los planetas encajaban sucesivamente dentro de una esfera y de los cinco sólidos platónicos. Newton vivió entregado a extrañas obsesiones, como averiguar las proporciones del templo de Salomón. El *Systema Saturnium* contiene un vaticinio numerológico algo desconcertante, que gira en torno al número 6, un número perfecto, puesto que es igual a la suma de sus factores primos ($6=3\cdot 2\cdot 1$; $6=3+2+1$). Huygens pronosticó que ya no se descubrirían nuevos satélites, puesto que tenían que ajustarse a la misma regla de perfección que sus hermanos mayores, los planetas. De igual modo que existía media docena de planetas, seis debían ser las lunas. La Tierra aportaba la suya, Galileo había descubierto cuatro satélites de Júpiter y Huygens había cerrado la cuenta con Titán. Cassini desbarataría esta armonía aritmética al señalar un séptimo satélite en el cielo, también de Saturno: Japeto.

EL ANILLO SE ROMPE

El principal obstáculo para el disco sólido que abanderaba Huygens es su estabilidad. La fuerza de la gravedad decrece de acuerdo con la inversa del cuadrado de la distancia entre masas (es proporcional a $1/r^2$, siendo r la distancia). Imaginemos un planeta P frente al que se alinean dos esferas iguales, a y b, separadas por una cierta distancia (figura 5). En este caso r_2 es mayor que r_1, luego la atracción entre P y a será mayor que entre P y b y las dos masas tenderán a separarse.

Si las dos esferas formaran parte de la masa de un mismo cuerpo, esta asimetría de las fuerzas tendería a deformarlo. La dependencia de la gravedad con la inversa del cuadrado de la distancia ($1/r^2$) también hace que la diferencia de tensiones aumente a medida que un cuerpo se aproxima a un planeta. La intensidad de la fuerza es particularmente sensible a las variaciones de distancia cuando r es pequeño, como se observa en la figura 6.

La curva representa valores de $1/r^2$. A la izquierda, cerca del origen, el cociente arroja valores grandes, que varían mucho de un punto a otro. Entre los extremos de la esfera *a*, $1/r^2$ pasa de valer 4 a valer 1. Una diferencia de 3. A la derecha, lejos del origen, el cociente adquiere valores pequeños. Entre los extremos de *b*, separados la misma distancia que los extremos de *a*, $1/r^2$ pasa de valer 0,0178 a valer 0,0156. Una diferencia de apenas 0,0022.

Por tanto, aunque *a* y *b* tengan el mismo tamaño, la variación en la intensidad de la fuerza que experimentan sus extremos da un salto considerable en el lado izquierdo de la gráfica, donde r es pequeño (cuando la esfera está muy cerca del planeta), mientras que apenas se aprecia en el lado derecho (cuando la esfera está lejos). Por tanto, la esfera apenas «sentirá» la presencia de P mientras se mantenga alejada, pero

FIG. 5

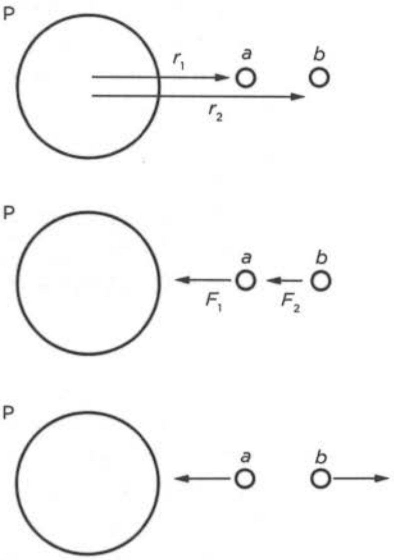
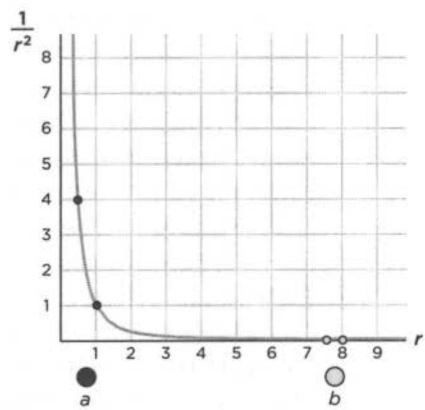


FIG. 6



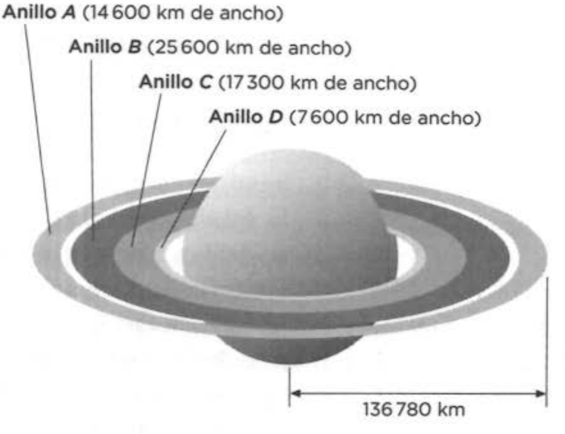
sufrirá una tensión disgregadora si se aproxima demasiado. Podemos visualizar el proceso en una secuencia en la que una esfera elástica se acerca al planeta *P*. A medida que se aproxima cede a tensiones cada vez mayores. La esfera se transforma primero en un huevo, que se estira y achata hasta que las fuerzas de cohesión pierden la partida y se rompe.

La distancia a la que se produce la rotura de un cuerpo por las disensiones entre las fuerzas gravitatorias a las que se ve sometido se llama «límite de Roche». La principal resistencia a la deformación la presentan las fuerzas electromagnéticas que atraen entre sí las partículas que componen la masa del cuerpo (interacciones químicas). Su labor de cohesión resulta más efectiva cuanto menos voluminoso sea el cuerpo. Así, un astronauta o los satélites de comunicaciones que orbitan la Tierra caen dentro del límite de Roche, pero sus reducidas dimensiones los protegen de la fractura. La gravedad, por tanto, levanta una frontera en torno a los planetas que impide la supervivencia de cuerpos de una cierta envergadura en sus inmediaciones. El radio de la órbita de los satélites grandes, como la Luna, siempre supera el límite de Roche. Entre los planetas del sistema solar, Júpiter ostenta el título de máximo «cascanueces», como tienen ocasión de comprobar los cometas que se internan demasiado en sus dominios.

Frente a fuentes gravitatorias extremadamente intensas, la deformación ni siquiera respeta a los objetos pequeños. Un agujero negro puede suscitar tensiones tan desiguales entre los pies y la cabeza de una persona en su proximidad como para desintegrarla. Es lo que se conoce de manera informal como «espaguetización».

Los anillos de Saturno están formados por un colosal enjambre de polvo y fragmentos de hielo que orbitan a su alrededor a diversas velocidades, dibujando mil círculos concéntricos. El tirón gravitatorio de los grandes satélites abre zanjas y divisiones que le dan su aspecto de disco fonográfico. Las cuatro franjas principales, visibles desde la Tierra, se designan mediante las letras *A*, *B*, *C* y *D* (figura 7). Su orden alfabético refleja el de su descubrimiento y también su disposición, desde el borde exterior hacia el centro. Las sondas espaciales aumentaron la jurisdicción de

FIG. 7

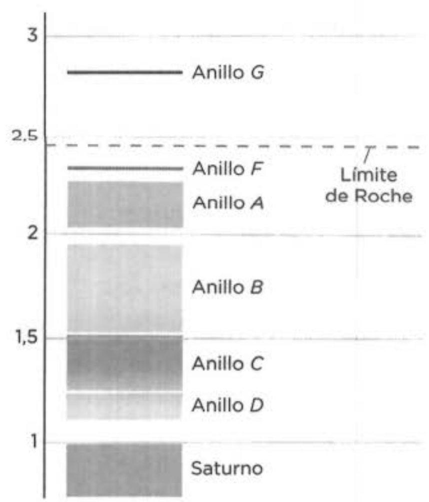


los anillos al localizar tres nuevas bandas, *F*, *G* y *E*, más amplias y difusas. Para ofrecer una idea de las dimensiones del sistema, podemos señalar que el borde externo de *A* se extiende hasta algo más de dos veces el radio de Saturno. La franja mayor, *E*, mide unas ocho veces el radio del planeta.

Wren tenía razón, el disco es extremadamente fino, apenas de 1 km de espesor, aunque se despliega a lo largo de una superficie que, si incluyera las regiones exteriores más tenues, cubriría la órbita de la Luna. Si se pudieran reducir las cuatro franjas principales al diámetro de un CD, su grosor correspondería al de una membrana celular. Al margen de dónde proceda su masa (de un satélite, de una sucesión de cometas capturados por la gravedad o de la materia primigenia del sistema solar que alimentó al resto de planetas), la razón última de su existencia hay que buscarla en el límite de Roche, puesto que la porción más densa cae dentro de sus fronteras. La figura 8 (en la página siguiente) permite apreciar con claridad esta situación. Las distancias se miden a partir del centro de Saturno y cada unidad es un radio del planeta.

La propuesta de que el anillo sólido en realidad estaba hecho añicos es casi tan antigua como la hipótesis de Huygens. Un año des-

FIG. 8



pués de que se imprimiera el *Systema Saturnium* ya la adelantó el poeta Jean Chapelain. En 1845, un joven estudiante de matemáticas de la Universidad de Cambridge, John Couch Adams, después de analizar ciertas irregularidades en la órbita de Urano, concluyó que se debían a las perturbaciones gravitatorias inducidas por la masa de un planeta desconocido. Sus vaticinios fueron ignorados por George Airy, astrónomo real y director del observatorio de Greenwich. Airy estimaba los argumentos matemáticos demasiado volátiles y se negó a orientar sus telescopios hacia las coordenadas señaladas por Adams. De modo que fue otro matemático de mente volátil, el francés Urbain Le Verrier, quien se apuntó el tanto y figura en las enciclopedias como descubridor de Neptuno.

Para conmemorar el ejercicio de clarividencia bien informada y olímpicamente despreciada de Adams, la Universidad de Cambridge instauró un premio en su honor. En 1856 se propuso como problema desentrañar si el anillo de Saturno era sólido, fluido o se componía de «muchas piezas separadas de materia». El único que se mostró a la altura del desafío fue un joven James Clerk Maxwell. Todavía faltaban unos años para que revolucionara la termodinámica y el electromagnetismo, pero ya enseñó sus garras. Maxwell sometió al anillo a un asedio matemático de dos años, con armas mucho más sofisticadas que las que tenían a su alcance los científicos del siglo XVII, gracias a un cálculo diferencial plenamente desarrollado. Encontró que un anillo sólido solo sería estable si concentraba 9/2 de su masa en un solo punto, una configuración extravagante que no se observaba. Así resumía sus conclusiones:

> [...] el único sistema de anillos que puede existir es uno que se componga de un número indefinido de partículas independientes, que giran alrededor del planeta con velocidades distintas en función de sus respectivas distancias. Estas partículas pueden disponerse en una serie de anillos estrechos, o se pueden desplazar y entrecruzar sin orden ni concierto. En el primer caso la destrucción del sistema será muy lenta; en el segundo caso será más rápida, pero podría manifestarse en las partículas una tendencia a ordenarse en anillos estrechos, que ralentizaría el proceso.

Curiosamente, cuando Airy leyó la obra de Maxwell comentó: «Que yo tenga noticia, se trata de una de las aplicaciones más notables de las matemáticas a la física». En *Sobre la estabilidad del movimiento de los anillos de Saturno* se perciben ecos del espíritu de Huygens. Si este advirtió el anillo antes que ningún telescopio, gracias a los ojos de la razón, Maxwell también vislumbró con ellos la dinámica de sus partículas, con un detalle que no se pudo registrar hasta casi cuarenta años después, mediante análisis espectrales.

Pocos científicos serían capaces de recorrer la senda que condujo a Huygens desde su primitivo interés por la refracción al descubrimiento de Titán y del anillo de Saturno. A lo largo del camino dilató el marco de la dióptrica con su disección matemática de las lentes. Introdujo mejoras en el telescopio, como el ocular que lleva su nombre, el diafragma o el micrómetro, que emanaban directamente de las leyes de la geometría. También aprendió a pulir lentes; diseñó y construyó un torno para facilitar la tarea y montó un telescopio que, si bien no obedecía a su pretensión de ser el mejor del mundo, tampoco desmerecía a los que producían los fabricantes más hábiles de la época. Con él reconoció un satélite que los demás no veían, aunque durante años lo tuvieran ante sus ojos. Mientras Saturno exhibía el anillo en todo su esplendor ningún astrónomo fue capaz de reconocerlo, Huygens lo hizo cuando Saturno lo ocultaba. De propina, calculó el período de Marte y estimó por primera vez las dimensiones del sistema solar.

Ante esta exhibición de facultades, que ponía en evidencia a matemáticos, artesanos y astrónomos, no quedaba otra reacción

que enmudecer de asombro. En su primer contacto con la luz, esta se había manifestado como un entramado de líneas rectas. A medida que Huygens se adentrara más y más en su naturaleza iría descubriendo otros rostros de la luz, tan cambiantes y contradictorios como los de Saturno. Los mayores enigmas aún estaban por venir.

CAPÍTULO 3

La esencia escurridiza de la luz

Cuanto más se investigaba la luz, más facetas contradictorias revelaba. De describir matemáticamente su comportamiento, Huygens pasó a preguntarse acerca de su verdadera naturaleza. Sus primeras respuestas pusieron los cimientos de la moderna teoría ondulatoria de la luz. La puerta de acceso al célebre principio que lleva su nombre se presentó bajo la forma de uno de esos rompecabezas físicos que tanto le gustaban: la doble refracción del espato de Islandia.

En la década de 1660 encontramos a Huygens convertido en uno de los principales actores en el teatro de la ciencia europea. Al mismo tiempo se estaban levantando los escenarios donde se estrenaría gran parte de los éxitos científicos de la época: la Royal Society de Londres y la Real Academia de Ciencias de París. Estas instituciones actuaron como catalizadores en la expansión del conocimiento y a su amparo surgieron las primeras revistas científicas, las *Philosophical Transactions* y el *Journal des Sçavans*. Huygens las aprovecharía como vehículo para difundir sus ideas, al margen de sus siempre laboriosos tratados. En ambas organizaciones fue admitido con una mezcla de admiración, por su talento, y de reserva, por su condición de extranjero.

Huygens viajó a Londres en 1661, formando parte de una comitiva diplomática que asistía a la coronación de Carlos II. El Gresham College, que presume de ser el centro de educación superior más antiguo de la ciudad y que constituiría una especie de ensayo general para la Royal Society, fue una de sus visitas obligadas. Si no se había llevado una primera impresión de París demasiado halagüeña, el Londres arrasado por los tumultos que habían precedido a la Restauración tampoco despertó su entusiasmo. Tras la muerte de Cromwell, el Gresham College había servido de cuartel y, según escribía el obispo de Rochester a Christopher Wren, los soldados se habían comportado como unos inquilinos de pesadilla:

> Hallé el lugar en un estado tan asqueroso, tan sucio y apestaba de un modo tan infernal, que si vinieras ahora a utilizar tu telescopio, serías como el rico que observa el cielo desde el infierno.

Cuando se pudieron reanudar las actividades ordinarias en el college, al nuevo rey le parecieron una comedia del absurdo. Según anota Samuel Pepys en su diario, Carlos II se había reído «con ganas en el Gresham College al ver que se perdía el tiempo en pesar el aire y que no se hacía otra cosa en todo el tiempo que estuvo allí».

Huygens no compartía el sentido del humor regio y asistió con entusiasmo a los experimentos con el vacío que desarrollaban Robert Boyle y Robert Hooke, inspirados por la obra pionera de Otto von Guericke. En el verano, de regreso en La Haya, se propuso fabricar su propia bomba. Hacia finales de año ya presumía de haber mejorado el diseño de Boyle. Los ingleses no dieron crédito a sus resultados, quizá porque no fueron capaces de igualarlos. Huygens ocultó los detalles de su modelo por temor a que lo plagiaran y no fue hasta junio de 1663 que se presentó en Londres dispuesto a demostrar la superioridad de su bomba de aire. Para no presenciar la exhibición, Boyle se marchó a Essex con el pretexto de visitar a su hermana, la condesa de Warwick. Solo después de que Hooke le advirtiera de que el artefacto del holandés tampoco aventajaba tanto al suyo, Boyle se dejó caer por el Gresham College.

VIDA EN PARÍS

El único lugar del mundo que podía rivalizar con Londres en una atmósfera estimulante y propicia a la investigación y al intercambio de ideas científicas era París. Huygens, además, sentía una mayor afinidad hacia la cultura francesa. Antes de viajar a Londres había disfrutado de una segunda estancia a orillas del Sena. En casa de Montmor había retomado las tertulias que tanto echaba de menos en La Haya: «Cada martes se celebra una reu-

nión, donde coinciden veinte o treinta hombres ilustres. Nunca me la pierdo».

No solo los hombres ilustres atraían su atención. También en París se enamoró de Marianne Petit, la hija de un ingeniero. La relación tropezó con barreras insalvables desde el comienzo. Hasta el retrato que Huygens intentó esbozar de la joven se le resistió. O quizá era un pretexto para alargar las visitas. Parece que la vocación de Marianne era acabar en un convento, y que un hereje protestante no era el mejor interlocutor para disuadirla del empeño. El fracaso en el cortejo pesó en el ánimo de Huygens durante meses. Cuando su hermano Constantijn le enviaba juegos de palabras que escondían mensajes picantes, él respondía con otros sobre astronomía.

> «Es cierto que no podría vivir en ningún otro sitio más feliz que en esta ciudad [París]. Sus exquisitos habitantes y su singular amabilidad me ligan a ella cada vez más.»
>
> — Christiaan Huygens.

Si Huygens buscaba un pretexto para instalarse en París, pronto recibió una invitación formal. El Rey Sol parecía decidido a transformar la capital de su reino en la capital del mundo entero. Una ambición desmesurada que también comprendía el ámbito del conocimiento. Por desgracia, en el momento de la fundación de la Real Academia de Ciencias, que había de convertirse en la máxima institución científica de Francia, la muerte conspiraba para llenar su panteón de hombres ilustres. Descartes había fallecido en 1650, Pascal en 1662 y Fermat en 1665. Huygens había aquilatado ya un enorme prestigio, que permitía compensar en parte las bajas. A pesar de ser extranjero se expresaba en un perfecto francés y su actitud cortesana resultaba tan familiar como aceptable en los círculos de París. Su nombre sonaba en todas las quinielas.

Una de las pocas tachas que podían comprometer su designación procedía, inesperadamente, de su padre. Desde 1650 la república holandesa había quedado sin estatúder. Viendo su estrella declinar a la sombra de los Orange, Constantijn explotaba el brillo

de Christiaan para mantenerse en el candelero, ya que seguía haciendo gestiones en favor de sus viejos patrones. Con frecuencia, para distender el ambiente de una negociación, organizaba una exhibición con los instrumentos científicos que fabricaba su hijo. Huygens experimentaba un rechazo visceral hacia estos montajes. Aunque nunca se opuso a ellos abiertamente, los boicoteaba a su manera. Con motivo de una linterna mágica que Constantijn le había encargado, le escribía a su hermano pequeño Lodewijk:

> Como le he prometido que le enviaría la linterna, tendré que hacerlo. No he sido capaz de encontrar una buena excusa para librarme. Pero cuando llegue, tú podrías, si te parece, evitar fácilmente que funcione. Tienes que quitar una de las tres lentes que vienen juntas. Yo me comportaré como si no tuviera la menor idea de qué es lo que falla y la explicación subsiguiente causará justo el retraso necesario. Todo sería por su propio bien porque, en mi opinión, no resulta apropiado que nuestro padre se entregue a semejante juego de títeres en el Louvre, y estoy seguro de que tú tampoco querrás ayudarle.

No sabemos si Luis XIV disfrutaba con los divertimentos que aderezaban las maniobras diplomáticas de Constantijn. Desde luego no debía de hacerle demasiada gracia colocar al frente de su rutilante academia al hijo de un holandés con una presencia política tan fuerte. Máxime, cuando la república se interponía en sus planes de expansión territorial. No obstante, después de ciertas vacilaciones, a Huygens le ofrecieron el puesto de director científico de la Academia en junio de 1665. Se mostró encantado:

> Es mejor y resulta más satisfactorio que me sienten en un caballo y me pague un rey, que permanecer ocioso en este país durante el resto de mis días.

El solemne acto de fundación se celebró un año después. En él participaron muchos de los científicos que habían acogido a Huygens en su primer viaje a París, como Auzout o Roberval. En el término de una década el orden jerárquico se había subvertido. De ser un joven prometedor, Ismaël Boulliau lo nombró «cabeza

suprema» del grupo. En agosto, Huygens se instaló en la Biblioteca del Rey, donde se había establecido la sede de la academia, así que podía asistir a las reuniones sin salir de casa. Recibió un salario de 6000 libras, que cuadruplicaba el de los miembros ordinarios. Hasta entonces se había mantenido a expensas de una generosa asignación paterna. La primera reunión oficial de la Real Academia de Ciencias tuvo lugar tres días antes de Navidad.

Huygens fijaría su residencia en París durante un largo período de quince años, en el que habría que descontar varias retiradas a La Haya, motivadas por problemas de salud, brotes depresivos y un enrarecimiento paulatino de la atmósfera política. Si en el siglo XVII Francia e Inglaterra parecían los destinos naturales para cualquier físico o matemático, no lo eran en absoluto para un holandés. La misma prosperidad que impulsaba la ciencia henchía las pretensiones geoestratégicas.

En una de las etapas más productivas de Huygens, entre 1652 y 1674, se declararon hasta tres guerras entre Inglaterra y Holanda por la hegemonía naval. En 1672, cuando Francia se incorporó a las hostilidades, sonó la hora del regreso de la casa de Orange. Que era decir lo mismo que la de los dos Constantijn, padre e hijo. El hermano de Huygens pudo interpretar por fin el papel que llevaba ensayando casi dos décadas y fue nombrado secretario del nuevo estatúder, Guillermo III. Constantijn, a los setenta y siete años, recuperó todo el pulso de su influencia. La decisión de Luis XIV de declarar la guerra a Holanda colocó a Huygens en una situación delicada. Ahora vivía en una nación hostil. Los franceses podían elegir entre verlo como un ilustre hombre de ciencia, ciudadano del mundo, o como un espía evidente, ya que estaba emparentado con los principales consejeros del enemigo. Una disyuntiva bastante fácil de resolver para la mayoría.

EL CIENTÍFICO HIPERACTIVO

La obra científica de Huygens que hemos repasado en los capítulos anteriores abarca un lustro, desde 1651 a 1656. Su abundan-

cia resulta engañosa. En realidad, en ese período acometió con éxito muchas más empresas. En concreto, el año 1652 provoca una sensación de vértigo. En doce meses enmendó la plana una vez más a Descartes y desarrolló su propia teoría sobre la mecánica de las colisiones, en la que estableció la conservación de la energía, estudió las aureolas del sol, inició su fértil investigación en dióptrica y produjo resultados en álgebra y geometría. Casi parece una broma cuando se dirige a Van Schooten y le confiesa que sufre una jaqueca paralizante: «Por el momento, sin embargo, debo privarme de estudiar, salvo que mi fuerza de voluntad pueda combatir el dolor».

La curiosidad hiperactiva de Huygens dejaba muchos frentes abiertos. Podía saltar de un asunto a otro en función de su interés o de los apremios de los demás. Sus investigaciones tan pronto avanzan como se detienen, se simultanean o se entorpecen unas a otras. Dos impulsos contradictorios contribuyen al estancamiento: su resistencia a dar un proyecto por zanjado y su facilidad para comprometerse con otros nuevos. Huygens compartía la excitación del cazador. Una vez pasada la euforia del descubrimiento, sentarse a escribir y organizar un tratado de acuerdo a una estructura lógica de hipótesis y deducciones resultaba menos tentador que lanzarse a una nueva pesquisa. De entre el denso tejido de inquietudes que progresan con frenazos y acelerones a lo largo de los años, componiendo una obra intrincada y diversa, en este capítulo vamos a seguir el hilo de la luz hasta el final. Fue el asunto que cautivó su curiosidad científica durante más tiempo, su empresa más sostenida.

Tras la publicación del *Systema Saturnium*, Huygens mantenía intacta su obsesión por dar con el diseño del telescopio perfecto. A partir de 1665 invirtió gran parte de sus energías en erradicar la aberración esférica. Recordemos que en ese mismo año había hallado una configuración de lentes donde un ocular cóncavo corregía la aberración de un objetivo convexo. Esta disposición correspondía, sin embargo, a un anteojo o telescopio terrestre. Huygens buscaba una solución apropiada para un instrumento astronómico. Ensayó la misma táctica de emparejar lentes esféricas de modo que cancelaran mutuamente sus aberraciones.

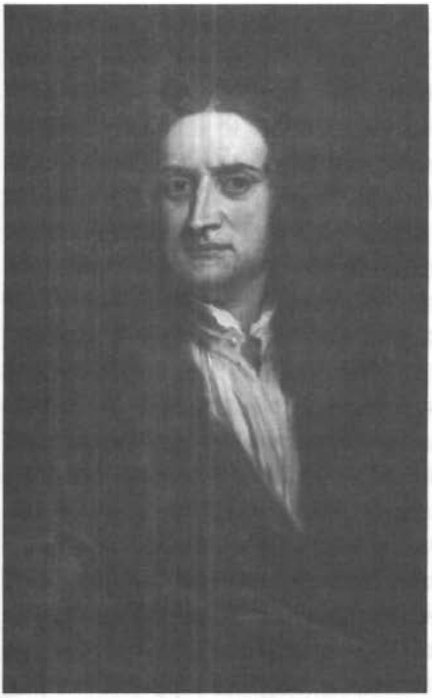




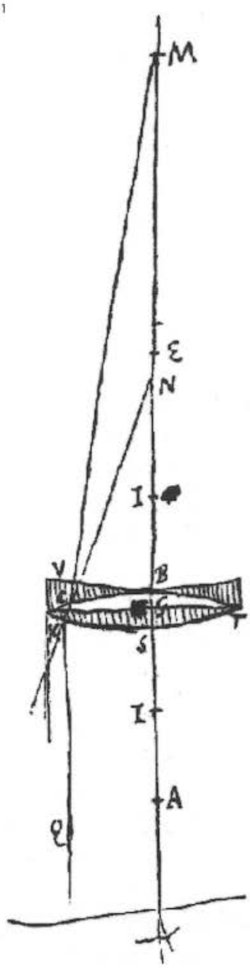
FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Retrato de Isaac Newton, con quien Huygens mantuvo acaloradas discusiones científicas.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Mosaico conmemorativo del científico holandés en la calle Leidsestraat de Ámsterdam.

FOTO INFERIOR:
***Colbert presenta a los miembros de la Real Academia de Ciencias a Luis XIV*, óleo de Henri Testelin. Hay quien reconoce a Huygens en la novena persona, empezando a contar desde la izquierda.**



FIG. 1



Sus esfuerzos culminaron el 1 de febrero de 1669. En lugar de actuar sobre el ocular, optó por duplicar las lentes del objetivo. El sistema de una lente bicóncava y una planoconvexa (figura 1) se comporta como un objetivo hiperbólico libre de aberración esférica. La clave de la receta radicaba en la relación entre el radio de las curvaturas, que Huygens estableció con exactitud.

El diseño llevaba el sello de Huygens: una elegante aleación de física y geometría, donde la materia corregía sus defectos siguiendo instrucciones matemáticas. Huygens había culminado por fin su monumental obra en dióptrica, al resolver el problema de la aberración. Ya estaba en condiciones, bajo su exigente punto de vista, de componer el gran tratado sobre la luz que le venían demandando desde hacía más de una década. Sin embargo, su mente volvió a dispersarse por culpa de otros asuntos.

En octubre de 1669, Isaac Barrow, primer titular de la Cátedra Lucasiana de Cambridge, daba a la imprenta sus *Lectiones XVIII*. En ellas aplicaba la ley de Snell a desentrañar el comportamiento de las lentes esféricas, cumpliendo el viejo sueño de Kepler. Huygens había completado la misma tarea quince años antes, pero había guardado tanto tiempo la fruta en el cajón que se le había terminado pasando. Se consoló considerando que, después de todo, esta pérdida de atribución no resultaba tan grave. Acababa de resolver un problema mucho más ambicioso, que exhibía un absoluto dominio de los resultados publicados por Barrow. Decidió retomar su dióptrica en un nuevo tratado que coronaría con su receta para curar el mal de las aberraciones.

NEWTON CONTRA HUYGENS

Huygens había escrito al lado de su diseño de 1669 el grito de guerra de Arquímedes: «¡Eureka!». Así solía reflejar en su cuaderno de notas el júbilo de cada descubrimiento. Cinco años después lo tachaba. ¿El motivo? Tenía nombre y apellido: Isaac Newton. En el primer curso que dictó como sucesor de Barrow en la Cátedra Lucasiana, Newton reconocía el enorme progreso que se había producido en el campo de la dióptrica, al tiempo que señalaba una pequeña grieta que amenazaba con derrumbar el edificio levantado por sus precursores:

> Sin embargo han dejado algo —de la máxima importancia, además— para que puedan descubrirlo quienes han seguido sus pasos; a saber, encuentro en las refracciones una cierta irregularidad que lo trastorna todo [...]. Por esta razón, me interno en la dióptrica no para ofrecer un nuevo tratamiento sistemático, sino para, de entrada, examinar a fondo esta propiedad en la naturaleza de la luz y después mostrar hasta qué punto mina la perfección de la dióptrica y cómo se puede evitar, hasta donde la naturaleza lo permite, este obstáculo. Voy a describir aquí diversos aspectos relacionados con la teoría y práctica de los telescopios y microscopios, para demostrar que el perfeccionamiento definitivo de la óptica —en contra de la opinión establecida— debe buscarse en una combinación de dióptrica y catóptrica.

La propiedad de la naturaleza a la que se refería Newton era su famosa descomposición de la luz solar al atravesar un prisma. Las líneas negras que trazaba la óptica geométrica escamoteaban un fenómeno óptico insoslayable: la luz blanca aúna rayos de diversos colores, que se desvían en ángulos distintos al atravesar un medio transparente. Por tanto, la lente convierte cada punto de un objeto en un borrón policromo, lo que origina una imagen distorsionada. Este defecto recibe el nombre de aberración cromática. Newton consideraba que tenía mucho más peso en la formación de imágenes que la aberración esférica y que, de hecho, arruinaba el futuro de cualquier telescopio compuesto solo

de lentes (dióptrica). La solución residía en un nuevo diseño, el telescopio de reflexión, que utilizaba espejos (catóptrica).

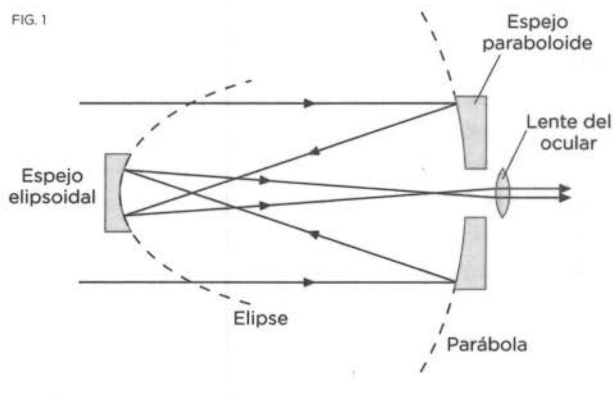
De hallarse Newton en lo cierto, la ambición de Huygens de perfeccionar el telescopio mediante sutiles arreglos de lentes estaba condenada al fracaso. De modo progresivo, Huygens fue tomando conciencia del terremoto que se avecinaba. En primer lugar leyó el artículo que Newton publicó en febrero de 1672 en las *Philosophical Transactions*. Su reacción inicial fue de cautela:

> En lo que respecta a su nueva teoría de los colores, la encuentro bastante ingeniosa, pero tendrá que verse si resulta compatible con todas las experiencias.

UN TELESCOPIO DE ESPEJOS

En la primera mitad del siglo XVII, en plena expansión de la industria óptica, la idea del telescopio de reflexión estaba en el aire. Fue apuntada entre otros por Descartes. Tras comprender que las lentes producían imágenes ampliadas al desviar el curso de los rayos luminosos, resultaba natural pensar en las posibilidades que ofrecían los espejos. En 1663, el escocés James Gregory propuso un primer diseño operativo, con dos piezas, una de sección parabólica y otra elipsoidal (figura 1). Lograr, sin embargo, que una superficie metálica bien pulida adoptase estas curvaturas suponía desafíos técnicos semejantes a que lo hicieran las lentes. Gregory, como en su día Descartes, terminó desistiendo.

FIG. 1



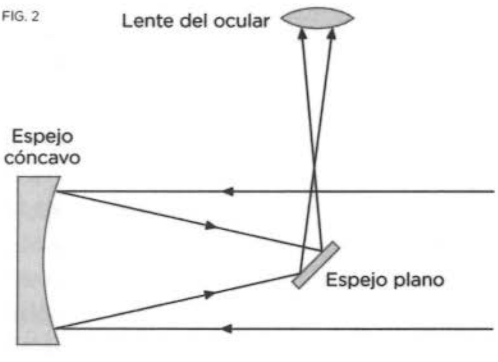
Desde luego, Huygens no compartía el negro futuro que Newton había pintado para los telescopios de refracción. Había pasado demasiados años trabajando con ellos:

> También tiene que reconocer, por tanto, que esta dispersión de los rayos no perjudica a las lentes tanto como él parece haber deseado que se crea, cuando propuso espejos cóncavos como la única esperanza de perfeccionar el telescopio.

Sospechaba que la crítica demoledora del inglés respondía en parte a una estrategia para realzar su propia propuesta de un telescopio de reflexión. En un plano menos utilitario, le pareció

En el espíritu de Huygens, de operar con los elementos que eran capaces de producir los artesanos, Newton desarrolló un prototipo más simple, a partir de un espejo plano y otro de corte esférico (figura 2). Diseñó sus propias herramientas y también preparó la aleación del espejo. El telescopio reflector ofrecía ventajas incuestionables. De entrada acusaba menos la aberración esférica. Como la luz no atraviesa en él ninguna frontera entre medios, tampoco sufría pérdidas de luminosidad ni la imagen se deformaba a causa de las irregularidades del vidrio o la presencia de burbujas. Por la misma razón se veía libre por completo de la aberración cromática. Su punto débil radicaba en el material reflectante. Su comportamiento debía aproximarse, hasta donde fuera posible, al de un espejo ideal y mantener sus propiedades sin nublarse al reaccionar químicamente con la atmósfera.

FIG. 2



que Newton introducía demasiados colores en su teoría. En su opinión, bastaba con dos: el azul y el amarillo. A la hora de responder a Huygens, Newton moderó su condena a la refracción, pero desmontó sus argumentos de una luz blanca integrada por una pareja de colores. Llegados a este punto, el cortesano Huygens estimó que el entusiasmo de Newton en llevarle la contraria resultaba incompatible con los buenos modales. A través del secretario de la Royal Society, Henry Oldenburg, anunció que se retiraba de la polémica: «Ver que sostiene sus opiniones con tanto ardor, me quita las ganas de seguir discutiendo». Sin embargo, dio al César lo que correspondía al César. En su cuaderno de notas tachó el «eureka» y escribió al lado: «Esta invención resulta inútil, debido a la aberración newtoniana que produce colores».

FIG. 2

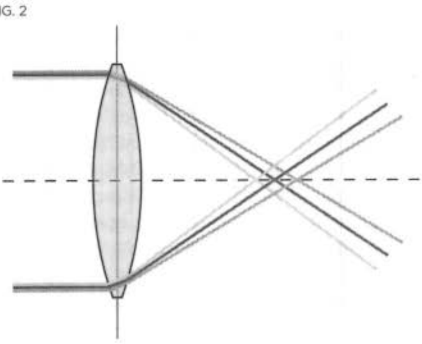
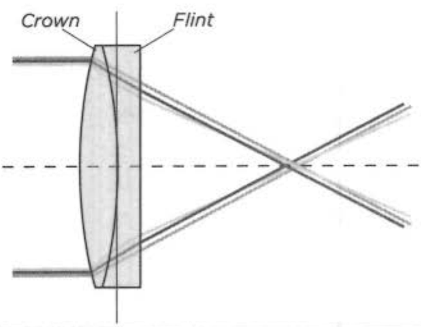


FIG. 3



Al final, la aberración cromática (figura 2) no enterró al telescopio de lentes. En torno a 1730, Chester Moor Hall, abogado inglés y científico aficionado, introdujo un nuevo enfoque donde pesaban tanto los ingredientes físicos como los geométricos. Su solución combinaba lentes de secciones diferentes, pero también de materiales distintos (figura 3). Así, por ejemplo, el ángulo de refracción de la luz cambia al atravesar un vidrio *crown* o un vidrio *flint*.

La publicación de los trabajos de Barrow sobre óptica y la teoría de Newton sobre la descomposición de la luz habían desbaratado en el plazo de unos meses una empresa científica de casi dos décadas.

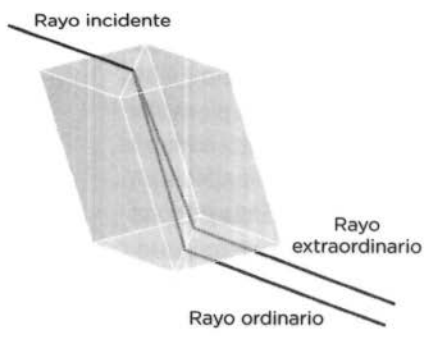
La curiosidad múltiple e infatigable de Huygens a veces se convertía en el mayor enemigo de su obra. Era responsable de una

dispersión que lo distraía constantemente de su objetivo y que dilataba sin cesar el momento de dar a conocer sus descubrimientos. También era su principal virtud. La curiosidad lo distraía de los fracasos e incluso le hacía ver en ellos la apertura de nuevos campos de exploración. Huygens había objetado a la teoría de los colores de Newton que: «incluso si fuera cierto que los rayos luminosos en origen fueran algunos rojos, otros azules, etc., todavía quedaría la gran dificultad de explicar mediante la física, en qué consiste la mecánica de esta diversidad de colores». Una puntualización justa, pero aplicable también a toda su interpretación de la dióptrica. La óptica geométrica había conocido su momento de esplendor durante la juventud de Huygens, pero había quedado superada por los acontecimientos. Incapaz de justificar los nuevos fenómenos, sus principios siguieron siendo de utilidad para el óptico y el artesano, pero debían abandonar la vanguardia de la física. Este vacío colocó a Huygens en la rampa de lanzamiento para una nueva investigación. El empujón definitivo, que le permitió encauzar sus inquietudes, llegó bajo la forma de uno de esos rompecabezas físicos que tanto le gustaban.

LA ROCA MISTERIOSA

A mediados del siglo XVII Islandia se hallaba bajo dominación danesa. En la primavera de 1668 el rey Federico III ordenó una expedición geológica que debía encaminarse a la costa oriental de la isla, hasta Helgustadir. Su objetivo era recoger muestras de una variedad de calcita que exhibía una transparencia fuera de lo común. Erasmus Bartholinus, profesor de geometría y medicina de la Universidad de Copenhague, estudió las propiedades ópticas del mineral y halló algo sorprendente. Cuando un rayo de luz incide contra una de las caras del espato de Islandia se divide en dos (figura 4). En su travesía a través del cristal los rayos divergen, hasta que vuelven a cruzar la frontera. Una vez en el aire, siguen su camino en paralelo. Esta duplicación de los rayos explica que si se mira a través del espato se observen imágenes dobles.

FIG. 4



Los dos rayos exhiben un comportamiento distinto. Uno se ajusta a la ley de Snell y en consecuencia recibe el nombre de «rayo ordinario». El otro se llama «extraordinario» y sus ángulos de entrada y salida no cumplen la relación de los senos.

En 1671, el astrónomo Jean Picard, miembro de la Real Academia de Ciencias, viajó a Copenhague y, a su regreso a París, llevó consigo varias muestras de espato. Haciendo gala de su obsesiva meticulosidad, Huygens las sometió a un examen escrupuloso y descubrió fenómenos que Bartholinus había pasado por alto. El más chocante se producía al situar dos cristales uno a continuación del otro. La luz, al incidir sobre el primero, se partía en dos. Sin embargo, al seguir su camino e incidir sobre el segundo, los rayos no se dividían. ¿Qué le ocurría a la luz en su viaje a través de la calcita? Además de desviarse, algo alteraba su naturaleza. Aquí Huygens había tropezado con un rasgo insospechado de la luz, puesto que el ojo humano no es capaz de percibirlo: la polarización. Muchos insectos y cefalópodos sí son sensibles a ella.

Como las apariciones de Saturno, la doble refracción revelaba un fenómeno natural que desafiaba el marco conceptual establecido. Si la luz se redujera a la óptica geométrica, algo como la calcita de Helgustadir no debería existir. Y, no obstante, la acababan de extraer de una cantera. La determinación de Huygens de explicar la doble refracción lo empujó más allá de los límites de la dióptrica. Emprendió un primer asalto a la cuestión en 1672, sin éxito. Cinco años después, durante un prolongado retiro en La Haya, consumó el ataque definitivo. El 6 de agosto de 1677 escribió en su cuaderno de notas un nuevo *eureka* que esta vez nadie le obligaría a tachar. En octubre, escribía a Jean-Baptiste Colbert —el influyente ministro de Luis XIV— para anunciarle que había resuelto el rompecabezas: «No es una maravilla pequeña

de la naturaleza, ni resultó fácil de desentrañar». A mediados de 1679 hizo una presentación ordenada de su teoría ante la Real Academia de Ciencias, que conformaría el grueso de su *Traité de la lumière (Tratado sobre la luz)*. Este, siguiendo su costumbre, no lo publicó hasta diez años después.

> «Mientras los geómetras demuestran sus proposiciones mediante principios incontestables, aquí los principios son corroborados por las conclusiones que pueden extraerse de ellos; la naturaleza de la materia tratada no permite otra cosa.»
>
> — CHRISTIAAN HUYGENS, *TRAITÉ DE LA LUMIÈRE*.

En la óptica geométrica todo lo que había que tener en cuenta era la curvatura de las lentes y la ley de la refracción. Simplemente con conocer la relación matemática entre α y β y asumiendo una propagación rectilínea de la luz su comportamiento se reducía a un problema de geometría. Empero, no se decía nada acerca de la naturaleza de la propia luz. ¿Cuál era el motivo de la ley de los senos? ¿Qué es realmente un rayo luminoso? ¿Se compone de partes o constituye una unidad elemental? ¿Cómo funciona el mecanismo de su propagación? Para Huygens había llegado el momento de abordar estas cuestiones:

> En óptica, como en cualquier otra ciencia donde la geometría se aplique a la materia, las demostraciones se apoyan en hechos experimentales; por ejemplo, que la luz viaja siguiendo líneas rectas, que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales o que los rayos de luz se refractan de acuerdo con la ley de los senos [...]. La mayoría de los autores que tratan la materia se contentan con asumir estos hechos. Sin embargo otros, con una mente más inquisitiva, han tratado de hallar su origen y su causa, considerándolos en sí mismos como fenómenos naturales dignos de interés. Y aunque han llegado a plantear algunas ideas ingeniosas, no bastan para que los lectores más inteligentes no deseen explicaciones más profundas que los dejen plenamente satisfechos.

Encontramos una prueba de la grandeza de Huygens en que, después de dedicar un cuarto de siglo a comprender la luz, de ver cómo otros le arrebataban sus hallazgos o cómo sus obje-

LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ

Existen otros procedimientos para propagar una perturbación física sin recurrir a las colisiones que Huygens introduce en su modelo de la luz. Encontramos un ejemplo sencillo en una cuerda donde uno de sus extremos se agita arriba y abajo, mientras el otro permanece sujeto. La perturbación opera en vertical, pero se propaga a lo largo de la cuerda en horizontal (figura 1). El concepto de «polarización» se puede aplicar a esta cuerda. Señalaría la dirección en que se agita la mano: arriba y abajo. Diríamos, en este caso, que la perturbación posee una polarización vertical. También podría presentar una polarización transversal, de derecha a izquierda (figura 2). Combinando desplazamientos transversales y verticales, la mano puede trazar un sinfín de trayectorias sin salirse del plano perpendicular a la dirección de propagación fijada. En lenguaje técnico se diría que la polarización de la cuerda muestra entonces

FIG. 1

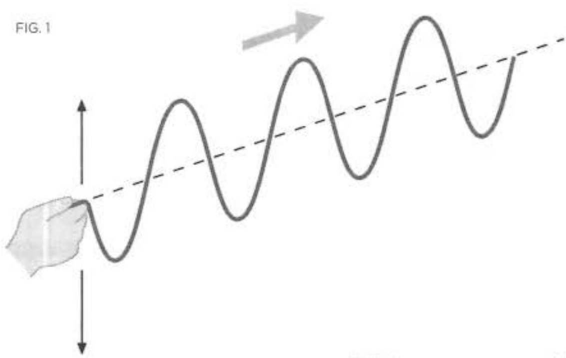
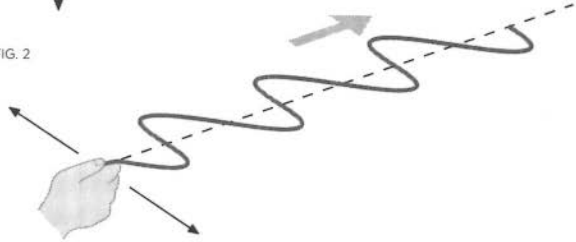


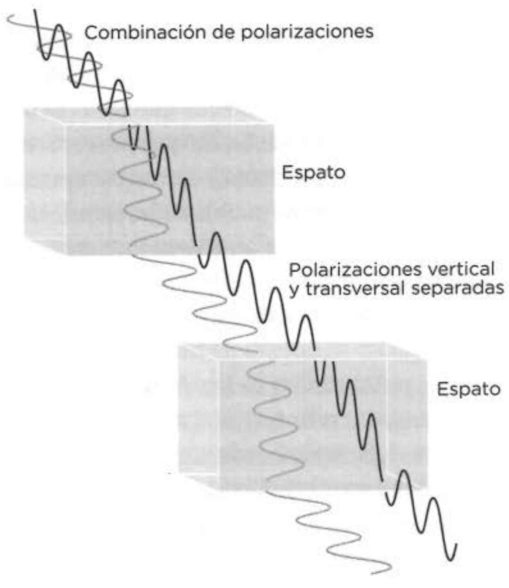
FIG. 2



tivos científicos se frustraban, fue capaz de producir por fin su obra maestra sobre la materia aplicando un enfoque del todo inesperado.

una mezcla de componentes transversales y verticales. Atribuimos a la luz un rasgo semejante, puesto que al cruzarse con una partícula cargada —como un electrón— es capaz de agitarla en una dirección perpendicular a la que sigue su propia trayectoria. La luz solar ofrece una mezcla de componentes transversales y verticales, pero la disposición espacial de los átomos en el espato de Islandia introduce una asimetría en la respuesta de sus electrones: unos pueden oscilar solo en vertical y otros, solo en sentido transversal. Cuando la luz del sol incide sobre ellos con su batiburrillo de polarizaciones, los electrones de un grupo solo responden a su componente transversal y los del otro, solo a la vertical. Cada clase desvía la luz en una dirección distinta y así se generan dos rayos: uno queda polarizado en vertical y el otro, en sentido transversal. Si a continuación se interpone en su camino un segundo cristal, los rayos ya no volverán a dividirse, ya que los electrones de cada grupo solo podrán responder a una de las dos polarizaciones (figura 3).

FIG. 3



ONDAS O PARTÍCULAS

Los científicos del siglo XVII trataron de atrapar la esencia de la luz en dos esquemas conceptuales que idealizaban fenómenos cotidianos: ondas y partículas. Ambos explicaban la propagación luminosa en todas direcciones y con velocidad finita, aunque recurrían a procedimientos incompatibles. Hasta el punto de que una de las versiones ondulatorias que se anticipó a la formulación de Huygens, debida al jesuita Ignace Gaston Pardies, se planteaba como un claro desafío al atomismo.

Las partículas, como las balas, no afectan a todo el espacio que atraviesan y la interacción con ellas responde al principio del todo o nada. O se choca contra una partícula o se evita. Las ondas exhiben un carácter menos radical. No se concentran en puntos o trayectorias lineales, se desparraman y barren el espacio de forma gradual, sin dejar huecos. Cada propuesta tenía sus ventajas e inconvenientes. Huygens veía una traba insalvable en el modelo corpuscular:

> [...] la luz consiste en un movimiento de la materia entre nosotros y el cuerpo luminoso. Si además tenemos en cuenta y consideramos la extraordinaria velocidad con que la luz se esparce en todas direcciones y también el hecho de que procediendo, como lo hace, de direcciones muy diferentes y en verdad opuestas, los rayos se interpenetran sin obstruirse unos a otros, entonces podemos comprender que siempre que vemos un objeto luminoso, no puede ser debido a la transmisión de la materia que nos llega del objeto, como por ejemplo un proyectil o una flecha que vuela en el aire [...]

En otras palabras, si la luz fuera una ráfaga de partículas, al cruzarse dos rayos, rebotarían. La experiencia dicta que dos haces de linterna se ignoran, como si ninguno advirtiera la presencia del otro. Sin embargo, la visión de Huygens se apartaba de la de Pardies, ya que no renunciaba a los átomos. En su modelo, las partículas interpretan el papel de mediadores. No se propagan, lo que se propaga es la perturbación que las sacude. Poco después de cumplir su papel transmisor, podemos encontrarlas más o menos

en el mismo lugar y estado, mientras la perturbación que las agitó progresa para afectar a otras partículas remotas. Se puede pensar en el coche que embiste a otro en un atasco y genera una sucesión de choques en cascada. La acción del primer vehículo termina desplazando al último de la fila sin haberlo tocado. En realidad, cada vehículo apenas se mueve, pero transmite el impulso decenas de metros.

Según Huygens las partículas de un cuerpo luminoso se agitan y colisionan contra las partículas de éter de su entorno inmediato, comunicándoles su agitación. Esta agitación será la luz, que se transmitirá en una cadena de colisiones hasta sacudir las células de nuestros ojos. Huygens no se pierde demasiado en el jardín del éter. Recurrió a él porque los experimentos de Robert Boyle y Evangelista Torricelli ya habían establecido que el sonido no se propaga en el vacío, mientras que la luz sí. La materia común, como el aire, no podía por tanto difundir ambas. Huygens postuló entonces la existencia de una materia sutil e invisible, el éter, integrada por partículas «que se aproximan a una dureza casi perfecta y que poseen una elasticidad tan pronta como se quiera». Ocupan todo el espacio que dejan los átomos que componen los sólidos, gases y líquidos. Huygens contempla la posibilidad de que el éter no penetre en los cuerpos, aunque él se inclina por que sí lo haga. En este sentido parece considerar la materia como una esponja, por cuyos orificios y recovecos se cuelan las partículas de éter.

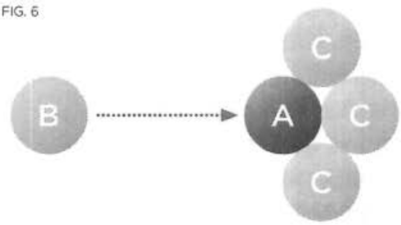
Partiendo de una fuente luminosa, la agitación local de sus partículas promueve una cadena de colisiones, cuyo efecto, visto desde la distancia, se traduce en la dilatación de un frente esférico que crece en torno, como en la disposición de fichas de dominó de la figura 5 (en la página siguiente), donde la caída de las piezas centrales se propaga en una cascada circular.

Este modelo de la luz aclara por qué dos rayos se atraviesan sin interferirse. Las partículas pueden bailar al compás combinado de dos cadenas de colisiones: «La misma partícula de materia puede servir a multitud de ondas que procedan de distintos frentes o incluso de sentidos opuestos». Recuperando el símil del coche atrapado en un atasco, este es capaz de transmitir los impactos de varios vehículos que vengan contra él desde cualquier

FIG. 5



FIG. 6



dirección, aunque se produzcan de manera simultánea.

Igual que en el ejemplo del dominó, cada ficha que cae no solo transmite su impulso en una dirección estrictamente radial, sino que lo difunde en un abanico más amplio, siempre hacia delante. En las fichas se debe a su particular disposición, de modo que al caer arrastran a más de una. Huygens recrea el mismo efecto mediante colisiones (figura 6).

> [...] cuando una esfera, como sucede aquí con *A*, se halla en contacto con varias esferas similares *CCC*, recibe el impacto de otra esfera *B*, de tal modo que ejerza un impulso sobre todas las esferas *CCC* que la tocan, les transmitirá la totalidad de su movimiento, tras lo cual permanecerá inmóvil, como la esfera *B*.

A escala microscópica, el modelo de Huygens despliega un colosal juego de billar en tres dimensiones, donde cada bola transmite el golpe que recibe y se detiene. Al menos en promedio. Cada partícula mantiene una cierta libertad de movimientos, igual que los coches que avanzan poco a poco en un atasco, pero, en lo que respecta a la luz, se comporta como un corredor de relevos que enseguida entrega el testigo.

EL PRINCIPIO DE HUYGENS

Aunque en muchas ocasiones se considere a Huygens fundador de la moderna teoría ondulatoria de la luz, hay que tener cuidado

con el significado que él atribuía a la palabra «onda», porque no coincide con el que asumieron científicos posteriores al extender sus ideas. La intuición física que guiaba a Huygens para visualizar cómo «se transmite sucesivamente» la luz se basaba en el sonido:

> [La luz,] como el sonido, debe propagarse en superficies esféricas u ondas; las llamo ondas a causa de su analogía con las que vemos formarse en el agua cuando arrojamos en ella una piedra y a causa de que nos permiten observar una semejante y gradual propagación en círculos, aunque responden a una causa diferente y solo se forman en una superficie plana.

Huygens toma de las ondas en el agua la «propagación gradual en círculos», pero advierte que «responden a una causa diferente». En particular, las ondas de un estanque son transversales: se propagan en una dirección perpendicular a la perturbación que las origina. La piedra cae en vertical, los círculos concéntricos se despliegan en horizontal. Las partículas del éter de Huygens transmiten la luz básicamente en la dirección de su movimiento, aunque abran su radio de influencia en abanico. En ningún caso menciona atributos característicos de un modelo ondulatorio clásico, como son la longitud de onda, la fase y la interferencia.

La pieza clave de su construcción es el llamado «principio de Huygens»: cada partícula afectada por un frente luminoso se transforma a su vez en el origen de un nuevo frente. En la analogía del dominó, la propagación se inicia con una ficha al caer, y cada ficha que cae derriba otras, extendiendo la perturbación en abanico. En tres dimensiones, las colisiones lo hacen en una sección de circunferencia:

> [...] cada partícula de una porción de materia en la que se propaga una onda, no debería de transmitir su movimiento solo a la siguiente partícula que se encuentre en una línea recta dibujada desde la fuente luminosa, sino que también comunica necesariamente una parte a todas las demás que la tocan y que se oponen a su movimiento. Por tanto, se sigue que alrededor de cada partícula se desarrolla una onda de la cual esa partícula es el centro.

El principio establece que si conocemos cómo es el frente de la perturbación en un momento dado (t_1), podremos determinarlo con exactitud en cualquier instante posterior (t_2). Basta con considerar cada punto del viejo frente (F_1) como fuente de nuevos frentes esféricos, secundarios, que se expanden progresivamente hacia fuera con un radio $r = v(t_2 - t_1)$. El frente resultante (F_2) será la superficie que envuelva todas las esferas a la vez en el estado en el que se encuentren en cada momento (figura 7). En cierto modo, el trasfondo de partículas de éter con sus colisiones sirve de coartada física para un método de construcción geométrico, un juego de regla y compás que permite dibujar cómo evoluciona la perturbación. La física, por supuesto, determina los parámetros de la composición, como la apertura del compás.

FIG. 7

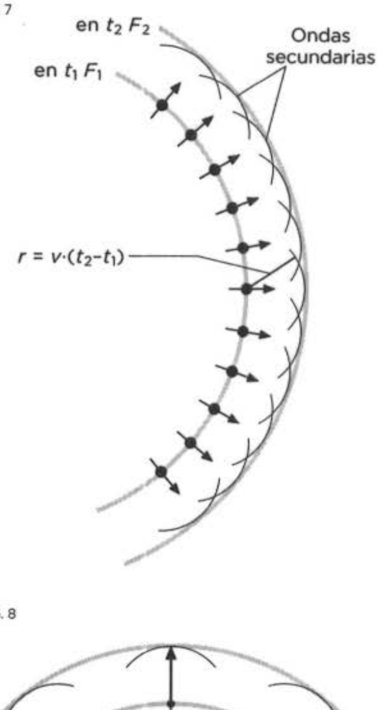
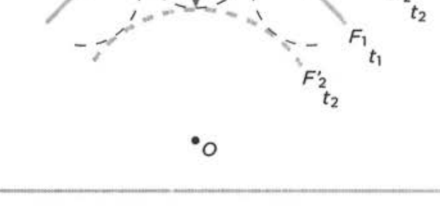


FIG. 8



Los frentes secundarios no se propagan exactamente como la perturbación original. Las pequeñas esferas no se expanden hacia el interior, en dirección a la fuente luminosa O. Desde cada punto del frente F_1 solo se genera la onda secundaria hacia fuera, para componer F_2. La onda hacia dentro que daría lugar a F'_2 no se produce (figura 8).

Conviene precisar que el efecto no es acumulativo. A medida que el frente avanza no va engordando con las aportaciones de esferas que progresan desde todos los puntos interiores. De ser así, al encender y apagar una bombilla se desataría una onda expansiva

de luz cada vez más intensa que nos cegaría. Como en la analogía de las fichas de dominó, la causa inicial solo barre cada punto una vez. Si se enciende y apaga la fuente, vemos la luz un instante y luego se desvanece.

Los casos más sencillos a los que puede aplicarse el principio de Huygens son la propagación de ondas planas y esféricas (figuras 9 y 10). Las líneas perpendiculares al frente de ondas (los radios en el caso de la esfera) conforman los rayos luminosos de la óptica geométrica.

FIG. 9

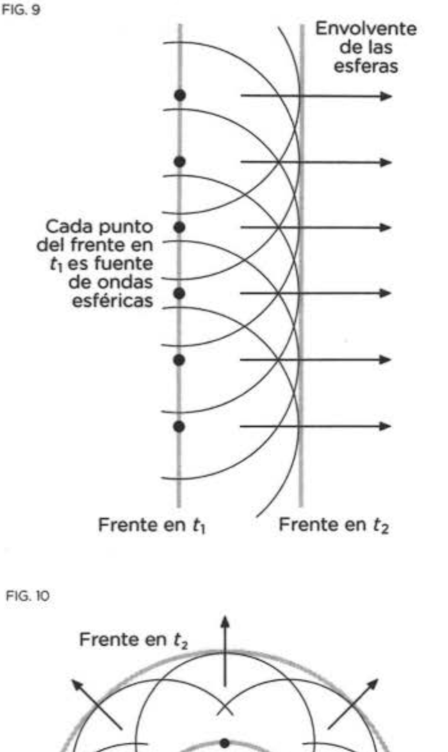
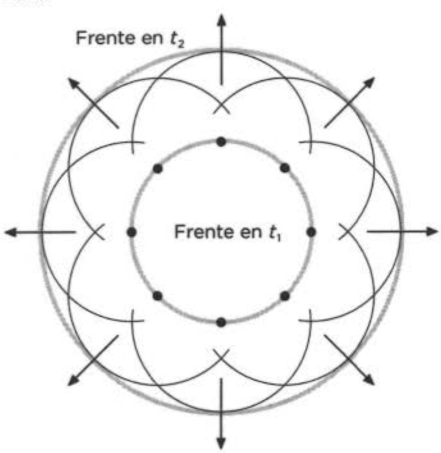


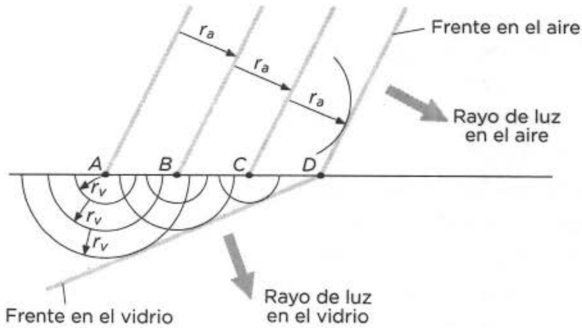
FIG. 10



A la vista de los ejemplos, la construcción de Huygens parece algo barroca y hasta innecesaria. ¿Por qué para averiguar el aspecto del nuevo frente no se dibuja sencillamente una línea recta detrás de otra o un círculo cada vez más amplio, a la distancia que corresponda en función de la velocidad de propagación?

La razón de ser del principio estriba en que resuelve la construcción de los frentes en situaciones menos obvias. Permite derivar, por ejemplo, la ley de Snell, llegando a determinar el valor de la constante numérica como cociente de las velocidades de la luz en cada uno de los medios. Para comprobarlo, vamos a situarnos en una frontera plana entre el aire y el vidrio (figura 11, en la página siguiente). El principio de Huygens se aplica en ambos medios, pero la luz viaja a

FIG. 11



mayor velocidad en el aire (v_a) que en el vidrio (v_v). Para esta diferencia, Huygens propone la siguiente explicación:

> Siendo la rarefacción de los cuerpos transparentes tal como se ha dicho, uno concibe con facilidad que las ondas se podrían transmitir en la materia etérea que ocupa los intersticios entre partículas. Y, por otra parte, uno puede concebir que la progresión de estas ondas debe ser un poco más lenta en el interior de los cuerpos, en virtud de los pequeños desvíos que las mismas partículas provocan.

Las partículas de éter transmiten la perturbación con más celeridad en la escasa densidad del aire, donde apenas encuentran tropiezos, que cuando se pierden en el esponjoso laberinto de la materia transparente. Para incorporar en nuestra construcción la disparidad de velocidades (v_a y v_v), las ondas secundarias esféricas tendrán un radio mayor en el aire (r_a) que en el vidrio (r_v). En otras palabras, la apertura del compás será mayor en un medio que en el otro. Podemos asumir que en el aire: $r_a = v_a \cdot t$; mientras que en el vidrio: $r_v = v_v \cdot t$, donde $v_a > v_v$ y, por tanto, para intervalos de tiempo iguales: $r_a > r_v$.

De nuevo, los rayos de luz de la óptica geométrica son líneas perpendiculares al frente de ondas. En cuanto un frente luminoso toque un punto *A* de la frontera, la colisión entre las partículas de éter desencadenará la propagación en el vidrio. Un intervalo de

LA LEY DE SNELL REVISITADA

La relación entre los ángulos α y β se deriva con facilidad con ayuda de dos triángulos (figura 1). El primero une *A* y *D* con un tercer punto *E*, que se ubica trazando una recta perpendicular al frente en el aire, que acabe en *D*. El segundo triángulo une *A* y *D* con un tercer punto *F*, que se sitúa trazando desde *A* una perpendicular al frente en el vidrio. A partir del diagrama se deduce que:

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{3r_a}{L},\ \operatorname{sen}\beta = \frac{3r_v}{L}.$$

Dividiendo los dos senos:

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{r_a}{r_v} = \frac{v_a \cdot t}{v_v \cdot t} = \frac{v_a}{v_v}.$$

Queda por ver si estos ángulos α y β son los mismos que trazábamos en los diagramas de la óptica geométrica, donde siempre se tomó como referencia una línea vertical y no la frontera horizontal. Basta recordar que dos rectas forman entre sí el mismo ángulo que sus perpendiculares. En la figura 2, el ángulo γ entre las rectas *a* y *b* es el mismo que forman sus respectivas perpendiculares *c* y *d*. Por tanto, el ángulo α entre las rectas $\overline{AE}$ y $\overline{AD}$ es el mismo que el que forman sus perpendiculares. La perpendicular a $\overline{AE}$ es el rayo 1 y la perpendicular a $\overline{AD}$ es una línea vertical. Luego es el mismo α de la óptica geométrica. El ángulo β se forma entre las rectas $\overline{AD}$ y $\overline{FD}$. Sus perpendiculares son una recta vertical y el rayo 2.

FIG. 1

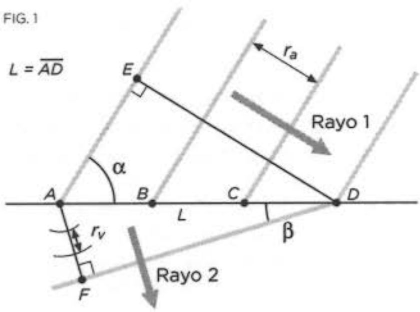
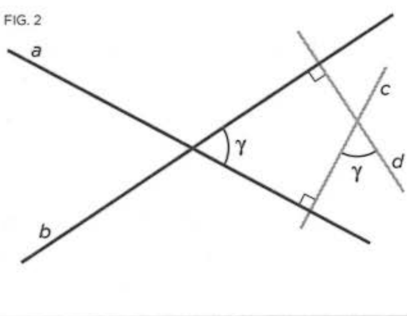


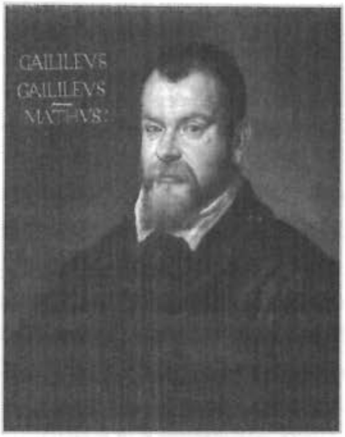
FIG. 2



tiempo después, el frente en el aire avanza un trecho de longitud r_a, y alcanza un punto de la frontera *B*, desatando en él un segundo frente de ondas esféricas. Entre tanto el frente esférico de *A* se

ha expandido dentro del vidrio con un radio más pequeño, r_v. Lo mismo sucede cuando el frente toca los puntos C y D. En cada intervalo de tiempo el frente en el aire avanza r_a y los frentes en el vidrio crecen r_v.

EL INTENTO DE GALILEO



Retrato de Galileo atribuido a Francesco Apollodoro.

El dato de que la luz recorre en el vacío 300 000 km en 1 s nos resulta familiar. Sin embargo, este número tan extraordinario permaneció durante siglos fuera del alcance de la tecnología y hasta la época de Huygens muchos tuvieron razones para pensar que se transmitía de forma instantánea. Galileo ideó un experimento para medir su velocidad, cuyo resultado pone de manifiesto lo arduo de la empresa. Consistía en situar a dos observadores, en una noche cerrada, en lo alto de dos colinas, separadas varios kilómetros. Ambos (el propio Galileo y un ayudante) portaban lámparas, provistas de una mirilla que se abría y cerraba, para encenderlas y apagarlas. Al comienzo del experimento permanecían apagadas. En el momento en el que Galileo encendía la suya ponía en marcha un cronómetro. La luz debía recorrer entonces la distancia entre colinas. En cuanto divisara la señal, el ayudante debía responder encendiendo la segunda linterna. Su luz emprendería el camino de vuelta hasta alcanzar a Galileo, momento en el que este detendría su reloj. Como conocía la distancia *d* entre colinas, le bastaba dividir *2d* entre el tiempo registrado para obtener la velocidad que buscaba.

Una medición imposible

Galileo fue incapaz de medir tiempo alguno. Tan pronto levantaba la mirilla de su linterna, divisaba un fulgor en la colina de enfrente. Los únicos retrasos apreciables cabía atribuirlos a los tiempos de reacción de los dos experimentadores. La luz se escurría como una anguila a través de las redes que Galileo había tendido para atraparla. Si su reloj hubiera podido medir décimas de segundo, los observadores se tendrían que haber separado una distancia mayor que el diámetro de la Tierra para provocar un retardo detectable.

El frente en el vidrio, en cada instante, es la superficie que envuelve a todas las esferas (círculos en la figura). Esta construcción ya nos permite calcular el ángulo entre la dirección de propagación de la luz incidente y la que se transmite en el vidrio.

La teoría corpuscular de Newton también atribuía la causa de la refracción a la disparidad en las velocidades de propagación, aunque el escenario microscópico que planteaba predecía justo el efecto contrario: que la luz viaja más rápido en los materiales más densos. Según la interpretación de Newton, la luz es una corriente de partículas. Cuando se aproximan a la frontera entre dos medios, su masa experimenta una mayor atracción neta hacia el material más denso, que las acelera. Esa aceleración se produce solo en la dirección perpendicular a la frontera, lo que cierra el ángulo de propagación hacia dentro.

La discrepancia entre ambas predicciones ofrecía, a priori, una manera de fallar en favor de una u otra teoría a través de un experimento, pero en el siglo XVII no se disponía de medios técnicos para medir la velocidad de la luz en el aire o el vidrio. Solo se había logrado acotar en el espacio, mediante observaciones astronómicas, que correspondían a su propagación en el vacío. Hasta un siglo después de la muerte de Newton, el físico francés Léon Foucault no determinó en un laboratorio que la luz viaja más despacio en el agua que en el aire. Para entonces la teoría corpuscular atravesaba uno de sus peores momentos. No levantaría cabeza hasta que Einstein introdujo los fotones en su descripción mecánico-cuántica de la luz.

LAS RAZONES DEL RAYO EXTRAORDINARIO

El principio de Huygens también describe la reflexión de la luz, pero, sin duda, el gran golpe de efecto vino de su análisis elegante de la doble refracción. Después de mucho bregar para encajar el fenómeno en el marco corpuscular, Newton solo consiguió expresarse en términos bastante arcanos, viendo en cada rayo de luz «cuatro lados o cuartos, dos de los cuales ocasionan la propiedad

CRONOMETRAR LA LUZ



Ole Rømer.

Vamos a plantear un experimento algo artificioso. Una máquina, en un punto *A*, dispara hacia delante una pelota con una velocidad constante *v* cada 10 segundos. Una persona *B* que se coloca frente a ella, a una distancia de varios metros, recibe la pelota poco tiempo después; pongamos que pasados 2 segundos. Si *B* permanece en su sitio, recogerá las pelotas con la misma frecuencia con que *A* las arroja: cada 10 segundos. No llegan de forma instantánea, pero como invierten el mismo tiempo en cada viaje, la regularidad de *A* se reproduce en *B*. ¿Qué ocurre si *B* se empieza a alejar en línea recta de *A*? La acción de la máquina seguirá siendo regular, pero para cada nuevo lanzamiento la distancia que debe recorrer la pelota habrá aumentado y, por tanto, también el tiempo que invierte en completar el viaje. Ya no llegará a *B* a los 2 segundos, sino a los 2,5 segundos, por ejemplo, a los 3 segundos, a los 3,5 segundos... Si *B* no fuera consciente de su desplazamiento se llevaría la impresión de que la pelota se retrasa. En cuanto se detenga, se reestablecerá la regularidad. Si, transcurrido un tiempo, *B* se pone de nuevo en marcha, ahora para acercarse a la máquina, la pelota tendrá cada vez que recorrer menos distancia. A medida que se reducen los tiempos entre una entrega y la siguiente, la llegada de la pelota se adelanta.

La caza de la luz

El astrónomo danés Ole Rømer observó el mismo fenómeno entre 1671 y 1676. En su caso el proceso regular que estudiaba no era el lanzamiento de una pelota, sino la ocultación de Ío, uno de los satélites de Júpiter, detrás del planeta. Como el período de la órbita es perfectamente regular, la desaparición debía repetirse tras intervalos de tiempo iguales. Sin embargo, Rømer encontró que durante la mitad del año el eclipse se adelantaba y durante la otra mitad, se retrasaba. En otras palabras, a lo largo de seis meses la Tierra, en su periplo alrededor del Sol, se acercaba a Ío, y a lo largo de los seis meses siguientes, se alejaba. A la luz le sucedía lo mismo que a la pelota que parte desde *A* hasta *B*: su tiempo de vuelo dependía de la distancia a una Tierra en movimiento. Parece que Huygens fue la primera persona que aprovechó los tiempos medidos por Rømer para calcular la velocidad de la luz, que estimó en 214 000 km/s. Una razonable aproximación, teniendo en cuenta la imprecisión en los valores que se manejaban entonces para las distancias interplanetarias.

de la que depende la refracción extraordinaria, mientras los otros dos lados opuestos no se relacionan con ella».

El principal logro de Huygens fue que aunque el rayo extraordinario no respete la ley de Snell, sí se somete a su principio, después de introducir una serie de adaptaciones razonables. Vamos a considerar un fragmento de espato que refleje la distribución espacial de sus átomos, responsables de sus peculiares propiedades ópticas. Obtenemos así un romboedro de seis caras iguales. Cada una de ellas presenta un rombo con dos ángulos obtusos de 102° y dos ángulos agudos, de 78°. Se disponen de modo que tres ángulos obtusos coincidan en dos vértices opuestos. En el resto de vértices se encuentran dos ángulos agudos y uno obtuso.

Para construir el rayo extraordinario, Huygens se apoya en un elemento de simetría del cristal: su eje óptico. En realidad, más que un eje, se trata de una dirección: la única en la que la luz no se divide al incidir sobre una cara del mineral. Para localizarla en la práctica, basta con rotar el cristal frente a un rayo luminoso, hasta que quede orientado de manera que desaparezca uno de los dos rayos que lo atraviesan. También se puede determinar recurriendo a la geometría. Se parte de uno de los vértices donde coinciden tres ángulos de 102° y se traza una línea imaginaria que forme el mismo ángulo con las tres aristas que coinciden en el vértice. El caso más sencillo se da cuando todos los lados del cristal son iguales (figura 12). Entonces basta con trazar una recta que una las dos esquinas opuestas de tres ángulos obtusos.

FIG. 12

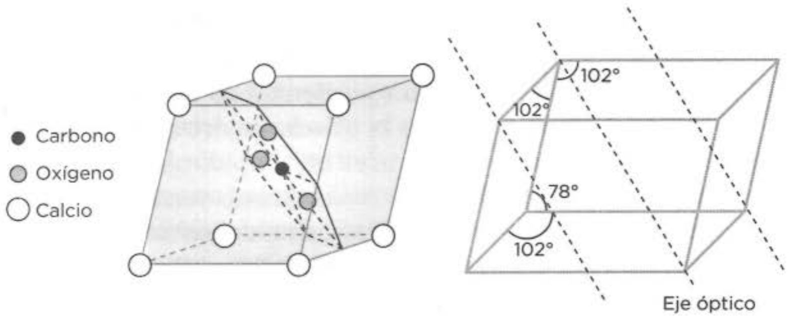


FIG. 13

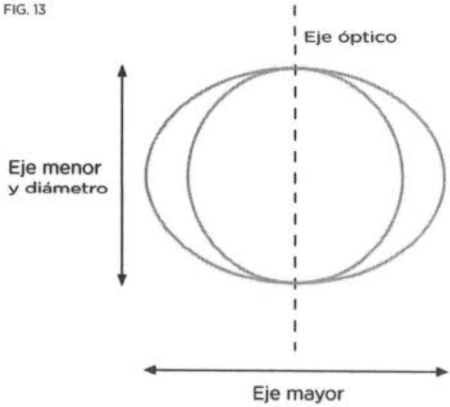


FIG. 14

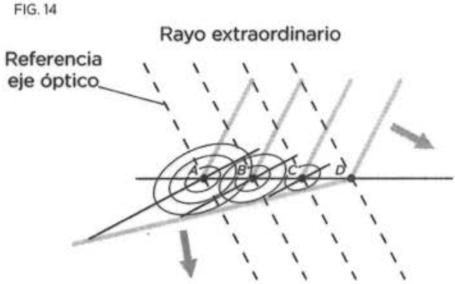
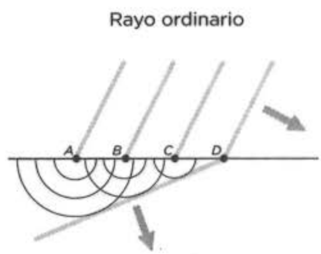


FIG. 15



Una vez identificado el eje óptico del cristal, disponemos de todos los elementos necesarios para producir los frentes, invocando el principio de Huygens. La principal novedad consiste en que cada punto del cristal que reciba la perturbación del frente luminoso se convertirá en generador de dos clases de frentes secundarios, que se expandirán hacia delante. Uno de ellos será esférico y dará cuenta del rayo ordinario. El segundo adoptará la forma de un huevo o, con más precisión, de un elipsoide.

Los elipsoides presentan menos simetría que las esferas: su aspecto cambia en función de cómo se orienten. ¿En qué direcciones hay que disponer sus ejes? La respuesta viene dada por las propiedades geométricas del cristal. Los elipsoides se orientan de modo que su eje menor quede paralelo al eje óptico. La longitud de este eje menor coincide con el diámetro de las esferas, puesto que la velocidad de propagación de ambos frentes es la misma a lo largo del eje óptico. En los dibujos, bidimensionales, el frente ordinario vendrá dictado por círculos crecientes y el secundario, por elipses (figura 13).

Vamos a seguir paso a paso la evolución del rayo extraordinario (figura 14). Como en el caso de la refracción normal, el

frente de ondas que llega desde el aire toca en un primer punto *A* la superficie del cristal, desatando un frente secundario. Cuando el frente en el aire alcanza *B*, en *A* ha crecido un elipsoide, cuyo eje menor es paralelo al eje óptico. Para una mayor claridad se han dibujado las elipses completas, pero la parte que queda en el aire no juega ningún papel. Como en la refracción ordinaria, los frentes secundarios solo crecen en el interior del cristal. Para determinar el aspecto del frente extraordinario en un instante dado, basta con generar la superficie que envuelve todos los elipsoides. La dirección del rayo será perpendicular al frente, como siempre. En las figuras 14 y 15 se muestra en paralelo la construcción de los dos frentes.

Llama la atención todo el espacio que dedica Huygens a describir la construcción geométrica de estos dos frentes en el *Traité de la lumière* y el poco que reserva a su justificación física. ¿Por qué se genera en el espato de Islandia un segundo frente elipsoidal y no en el resto de materiales transparentes conocidos hasta entonces? Huygens se limita a apuntar lo siguiente:

> Me parece que la disposición, o el orden regular, de estas partículas [que componen el cristal] contribuye a la formación de las ondas esferoidales (no se requiere nada más, para ello, que el movimiento sucesivo de la luz se propague un poco más deprisa en una dirección que en otra) y apenas albergo dudas de que en el cristal exista una disposición tal de partículas iguales y semejantes, debido a su forma y a sus ángulos de medida definida e invariable.

Las esferas corresponden a un desplazamiento de la luz igual en todas las direcciones. La ruptura de esta simetría deforma la esfera, estirándola en las direcciones del cristal donde la luz se propaga más deprisa y generando el elipsoide. Pero de nuevo: ¿por qué el espato de Islandia da lugar a esta asimetría? Huygens sugiere que la respuesta hay que buscarla en la disposición de las partículas que forman el cristal, pero tampoco ofrece más pistas. Desde luego, él era consciente de que su propuesta no proporcionaba una solución completa. Huygens cierra su estudio del espato haciendo referencia a cómo la doble refracción desaparece

cuando la luz se hace pasar por un segundo cristal. En un rasgo de honestidad científica presenta el fenómeno como un problema abierto:

> Aunque no he sido capaz hasta ahora de hallar la causa, no por esa razón me resisto a describirlo, para ofrecer a otros la oportunidad de investigarlo.

CAPÍTULO 4

El tiempo en sus manos

El tiempo acabó siendo una de las conquistas más sutiles y fundamentales de la revolución científica del siglo XVII. Huygens fue el primero en construir un reloj con la suficiente precisión para merecer el calificativo de instrumento científico. El diseño de su reloj de péndulo presenta otra perfecta simbiosis de geometría, física y mecánica.

París ofreció a Huygens todo lo que había ido a buscar: quince años de intensa actividad en uno de los centros neurálgicos de la ciencia institucional. El precio que tuvo que pagar a cambio fue una dosis considerable de su cordura. En enero de 1670, después de una fuerte helada, sufrió una indisposición que en principio se atribuyó a un enfriamiento. La naturaleza de su mal, sin embargo, pronto reveló raíces más profundas. No solo había enfermado el cuerpo, también el espíritu. Un mes después, Francis Vernon, secretario del embajador inglés, lo visitó y lo encontró postrado en la cama, rodeado de manuscritos, desplegados sobre las sábanas. Eran las obras que durante décadas no había tenido prisa por completar. Vernon detectó en Huygens síntomas alarmantes:

> Su debilidad y la palidez de su rostro dejaban bien claro hasta qué punto la enfermedad había menoscabado su salud. Y, no solo eso, observé algo peor, algo que ningún ojo alcanza a penetrar y ningún sentido a discernir. Se trataba de una disolución del espíritu, de una increíble necesidad de dormir, que él entendía tan poco como quienes le atendían. Al no saber a qué atenerse, se ha preparado para lo peor.

Convencido de que se hallaba a las puertas de la muerte, Huygens había reunido todos los descubrimientos de valor que no había publicado y le rogó a Vernon que los hiciera llegar a la

Royal Society. Al dar este paso, dejaba claro que sus compañeros de la Academia no le merecían demasiada confianza. Quizá el secretario del embajador inglés pecó algo de chauvinismo y exageró las opiniones de Huygens. Quizá no:

> Dijo que auguraba la desintegración de la Academia, porque la veía contaminada con todos los matices de la envidia, porque se sustentaba en las expectativas de beneficio, porque dependía por completo del humor de un príncipe y del favor de un ministro. En caso de que cualquiera de ellos viera remitir su entusiasmo, la estructura entera del proyecto de la asamblea quedaría condenada.

La incertidumbre sobre el desenlace de la enfermedad se alargó durante semanas. Huygens se mostraba bajo la influencia de su planeta talismán, Saturno, a quien la tradición atribuía el humor melancólico. Recibió la visita de Antoine Vallot, el médico real, pero, tres siglos antes de que se sintetizara el Prozac, el único remedio contra la depresión consistía en evitar la leche entera, que, al parecer, agravaba la tristeza. En cuanto se vio con fuerzas para resistir el largo viaje de regreso a casa, dejó atrás el norte de Francia y se recluyó en su vieja casa de La Haya. Allí pasó lo que quedaba de invierno. La atmósfera familiar y el cariño de sus parientes y amigos conjuraron poco a poco la sombra que lo cubría y hacia finales de año pudo pensar en retomar su vida.

UN HOLANDÉS EN PARÍS

A su regreso a París Huygens halló cualquier cosa menos sosiego. El año de 1672 pasaría a la historia como «el año del desastre» para los holandeses. Tuvieron que encarar una guerra que parecía imposible ganar, que les estalló en cuatro frentes, contra Francia, Inglaterra, Münster y Colonia. Al asomarse a la ventana de su domicilio parisino, Huygens escuchaba los vítores, el estrépito de los carros y de los soldados enardecidos que se dirigían a su tierra para conquistarla. En un gesto que muchos compatriotas no

le perdonaron, dedicó la que consideraba su obra magna, el *Horologium oscillatorium*, a Luis XIV. El tratado, que gira en torno al reloj de péndulo, salió de prensas francesas meses después de que se iniciaran las hostilidades y se abre con un encendido elogio al monarca. Cuando los holandeses que residían en Francia recibieron la orden de abandonar el país, se hizo una excepción con Huygens. El otoño trajo hasta la puerta de la Biblioteca del Rey a un joven de veintiséis años, llamado Gottfried Wilhelm Leibniz, que quería aprender matemáticas. Huygens aceptó el encargo de instruirlo y así se inició una amistad en la que no tardarían en invertirse los papeles de maestro y alumno.

Huygens hallaba en la ciencia un espacio donde refugiarse de los rigores del mundo, pero el placer que extraía de ella le acarreaba cada vez más efectos secundarios. Ya no era el joven prometedor que se dejaba guiar únicamente por la curiosidad, que se enfrascaba durante horas en el pulido de lentes, a solas o con su hermano, y al que los astrónomos y matemáticos animaban, sin considerarlo un rival. El ejercicio profesional de la ciencia y la dirección de una institución que debía responder ante un rey y sus ministros lo expusieron a intrigas, pugnas académicas y envidias que lo desequilibraban profundamente. En París, como representante de una nación enemiga que cobraba un sueldo exorbitado, estaba sometido a la presión añadida de obtener resultados que justificaran su posición. El afán por ocupar su puesto o las inquinas personales encontraron entonces una expresión aceptable si sabían disfrazarse bajo el rechazo al extranjero, al espía o al hereje. Para completar el cuadro, en la década de 1670 se vio envuelto en una serie de polémicas agrias, con adversarios que destacaban poco por su diplomacia o su carácter contemporizador. Entre ellos figuraba uno de los miembros más sobresalientes de la Academia, Gilles de Roberval, autor de la hipótesis de que los anillos de Saturno se debían a vapores que emanaban de su ecuador. Descrito como un hombre de «genio irreflexivo, irascible e impaciente en la discusión», atacó las ideas de Huygens sobre gravitación. El prolífico y suspicaz Robert Hooke también lo convirtió en el blanco de sus burlas, cuando estimó que pretendía arrebatarle el descubrimiento del reloj de muelle. La misma invención lo

enfrentó al relojero real, Isaac Thuret, que, después de introducir mejoras en su diseño original, quiso apropiárselo. Huygens era un científico que disfrutaba del esfuerzo por desentrañar, que vivía enganchado a la emoción del hallazgo, pero sentía pereza ante el proceso de publicación y aborrecía los conflictos derivados de su actividad como investigador.

En el ámbito privado tampoco le faltaban motivos para la melancolía. A medida que pasaban los años, la singularidad que exhibía su genio científico se extendía a la vida doméstica. Fue viendo cómo uno tras otro sus hermanos formaban una familia. En 1660 se casó Susanne; en 1668, Constantijn; y en 1674, Lodewijk. A este último Huygens le refirió así el descubrimiento del reloj de muelle:

> Tú tienes un hijo hermoso y yo, una hija invención, que es hermosa a su manera. Gozará de una larga vida, en compañía de su hermana mayor, el péndulo, y su hermano el anillo de Saturno, como los hijos del buen Epaminondas.

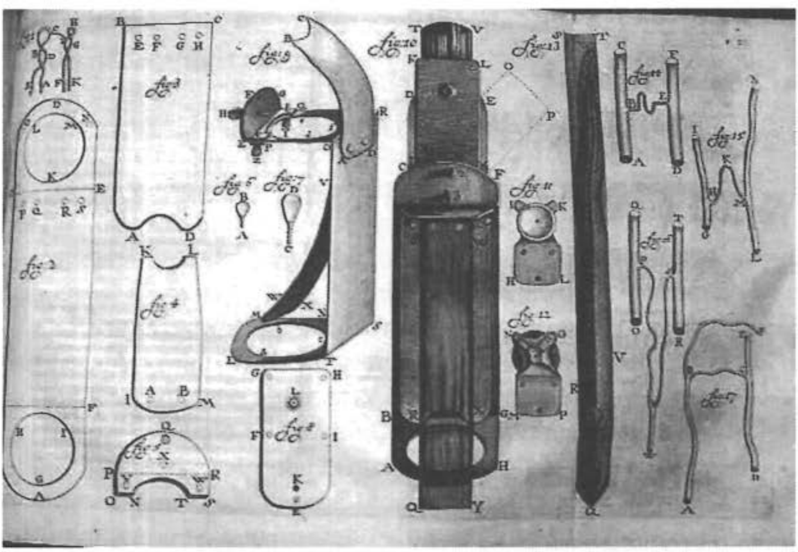
El general griego al que aludía tampoco se casó ni tuvo hijos, circunstancia que le afearon los tebanos, por privar al Estado de la riqueza de sus genes. A diferencia de Epaminondas, a Huygens la cuestión sí parecía preocuparle. A través de su correspondencia, se entreven diversas relaciones sentimentales, donde no faltan varios conatos de matrimonio que, como muchas de sus obras, nunca llegó a rematar. Al final de su vida, la soledad sería para él una condena.

Si la primera depresión atacó por sorpresa, se acumulaban los pretextos para una recaída. Su situación en Versalles se volvía más delicada conforme Francia veía alejarse la posibilidad de invadir los Países Bajos. Como tantas guerras que se eternizan, esta se había iniciado con la confianza en un triunfo fácil. Sin embargo, los holandeses habían tomado buena nota de las enseñanzas de Simon Stevin. Abrieron las esclusas para convertir el país en una isla inexpugnable y mostraron su maestría en el arte de construir fortificaciones.

Hasta qué punto el conflicto alentó la animadversión gala contra la patria de Huygens se aprecia en la huella que dejó en su

EL TELESCOPIO INVERSO

La microscopía fascinó a Constantijn Huygens padre, que presumía de llevar siempre encima una poderosa lente de aumento, hábito en el que lo había iniciado el inventor Cornelijs Drebbel, durante su etapa como embajador en Londres. Su principal contribución en este campo fue difundir, con la ayuda de su hijo Christiaan, la obra de su compatriota Antoni van Leeuwenhoek, que no sabía latín. Leeuwenhoek, de formación autodidacta, poseía una asombrosa destreza para confeccionar microscopios de una sola lente con diámetros milimétricos. Su curiosidad perspicaz y disciplinada lo convirtió en el primer gran explorador de la vida a una escala diferente de la humana (con permiso de Robert Hooke). En los charcos, en la saliva, en el semen, sorprendió una miríada de criaturas diminutas, de «animálculos», como él los llamaba, que exhibían insólitos diseños naturales. El más llamativo de sus descubrimientos fueron los espermatozoides, que revolucionaron las teorías sobre el mecanismo de generación de los seres vivos. Huygens no se podía conformar con traducir los textos de Leeuwenhoek y copiar sus dibujos. Aplicó sus estudios sobre la aberración esférica y su conocimiento matemático de la refracción a mejorar las configuraciones de lentes de los microscopios y la iluminación de las muestras. También observó infusorios (organismos unicelulares acuáticos) y bacterias.



Microscopios diseñados por Leeuwenhoek.

folclore. En el sitio de Maastricht murió D'Artagnan (el personaje de Dumas y el capitán de la guardia de mosqueteros que lo inspiró) y la guerra dio origen a una canción popular, que se canta aun hoy en día, *Auprès de ma blonde* («Al lado de mi rubia»), donde una joven llora a su marido, que «se llevaron los holandeses». En un juego de asociaciones libres era muy posible que al oír la palabra «Huygens» cualquier francés respondiera «Orange» y Luis XIV debía de ver al director holandés de su muy regia Academia cada vez con menos simpatía. En gran medida, si Huygens pudo permanecer en París fue gracias a la tutela de Colbert.

A finales de febrero de 1676, Constantijn hace sonar de nuevo las alarmas, en una carta a un amigo: «No me abandona una gran inquietud por la afección melancólica que mi querido hijo viene sufriendo desde hace algún tiempo en París». Una semana más tarde se desespera: «No sé qué se supone que debo pensar de esta dolencia. No tiene fiebre y los médicos me aseguran que no tengo por qué temer nada grave. Pero la enfermedad ha calado hondo [...]».

EL REGRESO A HOLANDA

En marzo, Huygens se apresuró a volver a La Haya. Esta vez alargó cuanto pudo la convalecencia, dominado por las dudas acerca de la conveniencia de su regreso. Quizá el reencuentro con las viejas herramientas que había utilizado en la fabricación de telescopios reavivó su fascinación por la dióptrica, y trató de mantener a raya sus fantasmas entregándose al diseño de microscopios.

Huygens no reunió el ánimo suficiente para volver a París hasta junio de 1678. La depresión se le había pegado igual que una sombra, o una suerte de fiebres tercianas, que tan pronto se aplacaban como resurgían. Cada invierno el frío y la falta de luz precipitaban la crisis. A comienzos de 1681 emprendió la enésima retirada. En su lenta recuperación solo le confortó una certidumbre: «No quiero permanecer en Francia, porque allí he caído enfermo en tres ocasiones y temo volver a hacerlo». Quizá Huygens había entrevisto una secreta relación entre París y su padecimiento, una intuición

ominosa de que si volvía sería para morir a orillas del Sena. En cualquier caso los franceses parecían tan interesados como él en ahorrarle ese trance. La muerte de uno de sus principales valedores, Colbert, en 1683, y la revocación, dos años después, del edicto de Nantes, que amparaba la libertad religiosa de los súbditos protestantes, liquidaron su atormentado idilio con Francia.

> «Dedico una parte del poco tiempo que me queda a dejar resueltos los asuntos de mi querido Arquímedes.»
>
> — Constantijn Huygens, en una carta a Henri de Beringhen.

En abierto contraste con la fragilidad de Huygens, su padre parecía indestructible. A los ochenta años había orquestado un retiro gradual de la vida pública, después de ceder el testigo a su hijo mayor. La gota le impedía tocar instrumentos musicales y se consolaba añadiendo versos a un torrencial poema sobre la vejez, en el que daba la impresión de conversar más con los muertos («las sombras sin lengua», como él los llamaba) que con sus últimos amigos. Seis décadas de actividad frenética velando por los intereses de reyes y príncipes le habían dejado un poso amargo, que se trasluce en el epitafio que compuso a la muerte de su perro: «Ojalá (y si fuera así, el mundo no sería peor) mi perrito estuviera vivo, y todos los grandes del mundo, muertos». Su preocupación había pasado de los asuntos de Estado al bienestar de su hijo Christiaan. Le ofreció el cargo que ocupaba al servicio de Guillermo III, pero Huygens estaba harto de la esclavitud de la corte. En el mismo mar de intereses, estrategias y maniobras donde su padre todavía se desenvolvía como pez en el agua, él se ahogaba. Entonces Constantijn se aseguró de que recibiera una parte del estipendio que le aportaba la casa de Orange.

Lúcido hasta el final, Constantijn Huygens no llegó a celebrar su noventa y un cumpleaños. Murió el Viernes Santo de 1687. Para el cortejo fúnebre se engancharon quince coches enlutados, que colapsaron el tráfico de La Haya, en lo que parecía un funeral de Estado. En el reparto de la herencia, la casa de la Het Plein fue a parar a manos del hijo mayor y Huygens se trasladó a Hofwijck,

la residencia familiar de verano, donde se retiró a sobrellevar su duelo. A los cinco días de instalarse allí, sintió la mudanza como un destierro:

> Durante este tiempo todavía no he ido a La Haya, ni he recibido noticias de la ciudad. Lo que me ha proporcionado un anticipo de la existencia solitaria a la que me debo ir acostumbrando.

LOS «PRINCIPIA» Y EL VIAJE A LONDRES

Huygens alivió el rigor de la soledad con la lectura de un voluminoso best seller: los *Philosophiae naturalis principia mathematica* («Principios matemáticos de la filosofía natural») de Newton. Antes de que Edmund Halley le hiciera llegar un ejemplar, ya le habían prevenido de que Newton se atrevía a cuestionar a Descartes. Poco le podía inquietar a Huygens que otros incurrieran en uno de sus vicios favoritos: «Me da igual que no sea cartesiano, siempre y cuando no nos venga con supercherías tales como la atracción». Se refería a la noción de acción a distancia, es decir, a la posibilidad de que dos cuerpos puedan influirse mutuamente sin que medie un intercambio mecánico, como una colisión. Huygens se desvaneció de la faz de la tierra durante meses. Cuando retomó su correspondencia en noviembre, fue para anunciar a su hermano Constantijn un pequeño cambio de aires:

> He pasado todo el invierno en Hofwijck, lo que me ha deparado unas cuantas noches miserables cuando el tiempo era malo. Pero uno se termina acostumbrando a todo [...]. Me gustaría visitar Oxford [Cambridge, en realidad], aunque solo sea para conocer a Newton. Después de leer la obra que me envió, siento una gran admiración hacia sus excelentes descubrimientos.

Newton y Huygens podían no ponerse de acuerdo en asuntos científicos, pero se respetaban. Newton elogiaba sobre todo la geometría física de Huygens, su manera de hacer. Cuando Ri-

chard Bentley, insigne humanista de la Universidad de Oxford, le pidió consejo antes de sumergirse en la lectura de los *Principia*, le hizo la siguiente observación: «Si puede conseguir un ejemplar del *Horologium oscillatorium* de Huygens, su examen cuidadoso le dejará mucho más preparado». Según Henry Pemberton, responsable de la tercera edición de los *Principia*, Newton «le consideraba el más elegante entre los escritores matemáticos modernos y el más perfecto seguidor de los antiguos».

En la obra de Newton, Huygens apreciaba una soberbia descripción matemática, a la que no terminaba de encontrar sentido físico. ¿De dónde surgía, por ejemplo, la gravitación? A este respecto, él se consideraba mucho más próximo al enfoque de Descartes, que había tratado de explicarla mediante la colisión de partículas de éter, que desviaban los cuerpos, aproximándolos. Para Huygens resultaba inconcebible que la materia ejerciera una atracción de forma instantánea por su mera presencia, sin ningún proceso de propagación. Era como el sortilegio de un mago que agita su varita y hace levitar a un ayudante. Cualquier perturbación física tenía que transmitirse mediante el contacto directo entre masas, como ocurría en su teoría de la luz. En su juicio sobre los *Principia* se mezclan en la misma medida admiración y discrepancia:

> Tengo en alta estima su discernimiento y su sutileza, pero creo que el autor los aplica a un fin equivocado en la mayor parte de la obra, allí donde estudia asuntos de escasa utilidad o cuando se apoya en el improbable principio de atracción.

En todos los sentidos, el libro le parecía un derroche de inteligencia. «No se ha producido nada mejor ni más astuto en torno a estas materias», reconoció.

Cuando llegó a Londres a mediados de junio, se sintió más en casa que en ninguno de sus anteriores viajes al extranjero. Dos meses atrás, un natural de La Haya, Guillermo III, había sido coronado rey de Inglaterra en la abadía de Westminster y entre su séquito importado de Holanda destacaba su hermano Constantijn. Sin ninguna exigencia institucional a la que someterse, Huygens disfrutó a fondo de la visita. En el Gresham College tuvo lugar una

de las sesiones más singulares e irónicas en la historia de la ciencia. Huygens dictó una conferencia sobre la gravedad y Newton correspondió con otra sobre la doble refracción del espato de Islandia. Ambos tuvieron oportunidad de hablar largo y tendido durante el verano, aunque no conocemos los detalles de sus conversaciones. Más tarde, Huygens mencionaría de pasada a Leibniz que Newton le había referido «unos cuantos experimentos espléndidos». Huygens intentó aprovechar la influencia de su familia en el nuevo rey para promocionar a Newton al puesto de director del King's College de Cambridge, sin éxito. También se reencontró con Boyle, que le recibió con todos los honores en su laboratorio.

EL CÁLCULO INFINITESIMAL

La estancia en Londres, en compañía de una de las sociedades científicas más brillantes, volvió intolerable la austeridad de Hofwijck. «Me resulta imposible pasar el invierno aquí, en esta soledad», se apresuró a escribir a Constantijn. El ánimo de Huygens vacilaba entre Escila y Caribdis. Era incapaz de soportar las tensiones y servidumbres de la Academia, pero tampoco se avenía con la vida de ermitaño. No halló la paz de espíritu ni en Versalles ni en la campiña holandesa. A finales de año, trató de buscar un nuevo equilibrio, alquilando un apartamento en la calle Noordeinde, en La Haya. A partir de entonces pasaría la mitad del año en el campo y la otra mitad, en la ciudad.

En febrero de 1690 retomó su correspondencia con Leibniz para enviarle el *Traité de la lumière*. Encontró a su antiguo pupilo en plena forma y convencido de que había inventado una herramienta matemática revolucionaria: el cálculo infinitesimal. Al principio, con sinceridad, Huygens consideró el procedimiento «bastante oscuro». Sin embargo, había logrado despertar su curiosidad. Para satisfacerla, Leibniz le dictó un cursillo acelerado por correo. Cuando dejó de parecerle oscuro, no le encontró la gracia. Huygens fue capaz de resolver cualquier problema que Leibniz le planteara para demostrar la superioridad del cálculo mediante sus

refinados despliegues geométricos. En respuesta a una carta del matemático francés Guillaume de L'Hôpital, que discutía la misma cuestión, comentó: «No veo necesario el método de cálculo del señor Leibniz en este asunto y tampoco creo que sea tan útil como él parece pretender». Para quienes carecían del virtuosismo de Huygens, sin embargo, este nuevo lenguaje, en el que se iba a expresar el grueso de la física hasta el siglo XX, llegó como llovido del cielo. Huygens desarrollaba una estrategia original a la medida de cada problema, mientras que el cálculo ofrecía una técnica para tratarlos y resolverlos de forma sistemática. El invento de Leibniz (y también de Newton, que desató una verdadera guerra de atribución) dio un impulso extraordinario a la física matemática. Permitió derivar con sencillez resultados que de otro modo dependían de análisis laboriosos o de un golpe de genio. Su principal virtud para la mayoría suponía el principal defecto para Huygens, porque a su juicio, al suministrar fórmulas prefabricadas, entorpecía la relación entre su intuición física y los fenómenos.

EL «COSMOTHEOROS»

Mientras su mente se mantuvo lúcida, siguió alimentando su curiosidad científica. Quizá para conjurar una Tierra que cada vez le resultaba más inhóspita, en su última obra Huygens proyectó su imaginación más allá de las nubes. En el *Cosmotheoros* se embarcó en un recorrido cósmico, en el que los humanos, con sus miserias, quedaban relegados a un plano muy secundario. Sus páginas contienen un ameno repaso de sus descubrimientos astronómicos. También plasmó en ellas su visión física del mundo, aprovechó una vez más para criticar a Descartes y, finalmente, se entregó al puro placer de la especulación. Aceptó que había vida inteligente en el resto de planetas y trató de deducir su anatomía y cómo se organizarían sus sociedades. Soñó con animales que multiplicaban por quince el tamaño de los elefantes y que atravesaban las planicies de Júpiter, y con habitantes de Venus con mejores aptitudes musicales que los humanos. Con el *Cosmotheoros* Huy-

gens anticipó el tono de la ciencia ficción «dura», ya que sometió su fantasía a los límites de los conocimientos de la época. El libro adopta el formato de dos cartas extensas dirigidas a su hermano Constantijn. Al leerlas, se tiene la sensación de asistir a una de las conversaciones que debieron de mantener en su juventud, en una noche estrellada cualquiera, mientras escudriñaban el cielo con los telescopios que habían fabricado juntos.

«Por decirlo en pocas palabras, fue uno de los grandes ornamentos de nuestro tiempo.»

— Elogio de Leibniz a Huygens.

A su regreso de Londres, Huygens se había visto abrumado por la sensación de que clausuraba una gira de despedida. Anotó en un cuaderno una especie de diálogo interior, donde reflejaba parte de sus inquietudes:

> ¿Te gustaría ser inmortal? ¿Por qué no, siempre y cuando se te conceda un cuerpo fuerte y sano y una mente fuerte y sana? Pero si la vejez trae consigo decadencia física y debilidad mental, ¿no preferirías entonces morir o bien procurarte una salida por tus propios medios?

A sus sesenta y cinco años, Huygens no albergaba ya ningún anhelo de inmortalidad. La mala salud le iba arrebatando cada vez más horas y más días. Un despojamiento progresivo que aceptaba con resignación: «Veo que uno termina por acostumbrarse a todo esto». Su inteligencia, su principal aliada frente a los infortunios, se acabó convirtiendo en su peor enemiga: «La mente infecta todo lo que toca de una miserable enfermedad». En marzo de 1695 mandó llamar a un abogado para dejar listo su testamento. En él manifestó su deseo de que Constantijn se hiciera cargo de la publicación del *Cosmotheoros*. Asumía que ya nunca vería el libro impreso. Mediada la primavera, su hermano abandonó el palacio de Whitehall y cruzó el mar para visitarlo en el piso de la Noordeinde, en La Haya. En los últimos momentos, Huygens vivió atormentado por el miedo a perder la razón. Se convenció de que trataban de

envenenarlo y se autolesionaba con cristales rotos. En la noche del 9 de julio, al fin, pudo descansar.

LA DIVISIÓN DEL TIEMPO

En su afán de retratar físicamente el movimiento de los cuerpos, Galileo se enfrentó al problema de medir el tiempo. Necesitaba registrar posiciones en instantes sucesivos, con suficiente precisión para luego ajustar las observaciones a patrones matemáticos. Las distancias se podían establecer con razonable exactitud, pero la variable temporal mostraba un comportamiento más escurridizo. Se pueden practicar en una vara muescas a distancias iguales, pero ¿qué método sirve para marcar intervalos semejantes en algo tan intangible como el tiempo? ¿Qué fenómenos de la naturaleza ofrecían la regularidad requerida para servir de escala?

Quizá no sea casualidad que, dentro de la mecánica, los grandes avances de los antiguos se restringieran al campo de la estática y al estudio de situaciones de equilibrio, donde los sistemas no cambian con el transcurso del tiempo. Los historiadores de la ciencia han polemizado sobre qué relojes pudo manejar Galileo para deducir las primeras leyes de la dinámica. Hay quien sospecha que utilizaba clepsidras, o relojes de agua; otros defienden que, siendo un intérprete consumado de laúd, se servía de ritmos musicales para generar intervalos de tiempo muy cortos aproximadamente iguales. Tampoco faltó quien pusiera en duda que realizara experimento alguno, afirmando que sus leyes eran el fruto de especulaciones afortunadas.

En 1961 un estudiante de doctorado de la Universidad de Cornell, Thomas Settle, reprodujo en el salón de su apartamento compartido los experimentos que Galileo había descrito en la jornada tercera de los *Discorsi*. Cronometró el descenso de una bola de billar a lo largo de un plano inclinado, sirviéndose de un rudimentario reloj de agua, que había fabricado con una maceta y un tubo. Recogió una colección de datos que no llegaban a desviarse una décima de segundo de los valores teóricos.

Regresando al siglo XVII, el progreso en mecánica, y también en astronomía, demandaba relojes cada vez más precisos. Los gobernantes, libres en principio de toda inquietud científica, tomaron cartas en el asunto por sus implicaciones náuticas y ofrecieron cuantiosas recompensas para incentivar la investigación. En un período en el que los barcos ya recorrían rutas comerciales aventuradas, cruzaban el océano Atlántico o bordeaban África para llegar hasta la India, los marineros todavía carecían de un sistema fiable para localizar su posición en alta mar. Con frecuencia

CRONOMETRANDO EL ESPACIO

Para ubicar un punto cualquiera *P* sobre la superficie terrestre bastan dos números. El primero se obtiene cortando el planeta en una serie de rodajas paralelas al plano del ecuador. Cada rodaja se identifica mediante un ángulo que se llama latitud. Una vez que se selecciona una rodaja, ya solo queda establecer en qué punto de su circunferencia se sitúa *P*. Para ello se recurre a un segundo ángulo, la longitud. En el caso de la latitud, el ecuador sirve de referencia natural para medir los ángulos. Para la longitud hay que fijar una referencia convencional, el meridiano de Greenwich, que es un arco de circunferencia que va de polo a polo cruzando una localidad inglesa cercana a Londres. Sobre una esfera llena de accidentes geográficos que sirven de orientación y con ayuda de un buen mapa, resulta difícil extraviarse. Es lo que sucede en tierra. El problema surge en una superficie desnuda, libre de puntos de referencia, como el mar. ¿Cómo averiguan los marineros su posición a lo largo de una travesía prolongada y rica en percances?

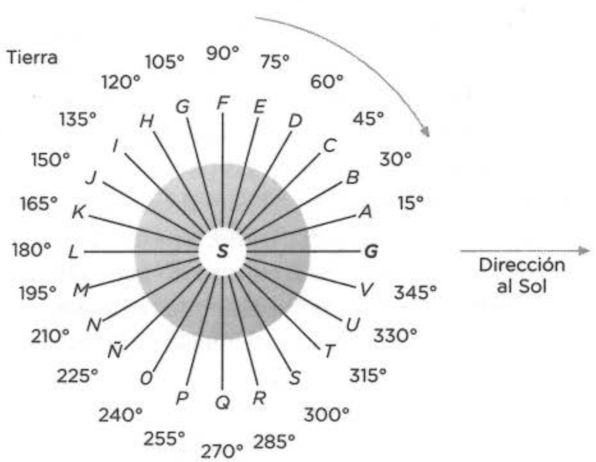
Latitud y longitud

La rotación de la Tierra proporciona un norte y un sur (un eje) y un ecuador naturales. Su movimiento hace que los cuerpos celestes se desplacen para los observadores terrestres, marcando referencias. Al medir el ángulo entre el horizonte y el Sol (de día) o la Estrella Polar (de noche, en el hemisferio norte; en el austral, la Cruz del Sur), se puede determinar la latitud. Con la longitud hay que proceder de otro modo. La Tierra completa una vuelta alrededor de su eje cada 24 horas, así que cada hora rota 15° ($24\ \text{h} \cdot 15°/\text{h} = 360°$). Si nos situamos sobre el polo Sur, veremos que la Tierra se comporta igual que una ruleta que gira 15° cada hora en el sentido de las agujas del reloj. Podemos iniciar la observación en el momento en que Greenwich (*G*) enfrenta al Sol. En ese instante allí será mediodía y para sus habitantes el Sol se encontrará en

se perdían, enfrentado a la tripulación a la muerte por inanición, por escorbuto o al naufragio. La solución práctica al llamado «problema de la longitud» parecía residir en la medición del tiempo, con instrumentos que fueran capaces de arrostrar, como las brújulas, cualquier zozobra que comprometiera la travesía.

Huygens se aproximó a los relojes con el mismo ánimo con el que había abordado los telescopios: el de construir un instrumento perfecto. Para ello examinó la cuestión bajo todos los ángulos, tanto técnicos como físicos y matemáticos. Tampoco pudo

el punto más alto respecto al horizonte. A cada hora que pasa, Greenwich se aleja del punto de mediodía 15°. A medida que progresa la rotación, todos los puntos de la Tierra irán experimentando su mediodía (despreciamos aquí los efectos que introduce la inclinación del eje). Para el punto *A*, que está a 15°, ocurre una hora después que en *G*; en *B*, a 30°, a las dos horas; en *Ñ*, a 225°, quince horas después. Por ello, un marinero que navegue con un reloj que mantenga la hora local de Greenwich, podrá determinar su posición. Cuando el Sol alcance el punto más alto sobre el horizonte (su mediodía) un vistazo al reloj le indicará la diferencia horaria con Greenwich y con ella, los grados que lo separan de este meridiano: su longitud.



evitar que, a lo largo del camino, su curiosidad divagara y lo detuviera a examinar con más detalle muchos aspectos accesorios. Y a la inversa, en el proyecto también aplicó resultados de investigaciones previas, como su estudio del movimiento circular.

Los relojes que marcaron las horas y los minutos de los faraones o los césares aprovechaban fenómenos naturales que progresan a un ritmo regular, como el movimiento del Sol o la consunción de una vela, o cuya constancia propicia acciones con la misma duración —como la caída de un puñado de arena de un recipiente a otro bajo el influjo de la gravedad—. El reloj de péndulo llevó a cabo la transición hacia un planteamiento más sofisticado: la explotación de fenómenos periódicos, cuya esencia consiste en repetir un mismo proceso ciclo tras ciclo.

Identificar un fenómeno periódico es como encontrar una regla en la naturaleza que ya trae marcadas las divisiones temporales iguales. La frecuencia de la luz o del sonido constituye un buen ejemplo. La escala atómica ofrece un catálogo completo de fenómenos periódicos, inaccesibles para la tecnología humana hasta el siglo XX. Hoy en día, la mayoría de los relojes sigue el ritmo que marcan las vibraciones de un cristal de cuarzo sometido a un pequeño voltaje.

Los científicos del siglo XVII tuvieron que ganarse los movimientos periódicos con el sudor de su frente. Cuenta la leyenda que en sus tiempos de estudiante, asistiendo a una misa en la catedral de Pisa, Galileo se fijó en el vaivén de una lámpara que colgaba del techo y que acababan de encender. Valiéndose de su propio pulso —otro fenómeno natural más o menos periódico— como cronómetro, llegó a la conclusión de que el tiempo invertido en cada oscilación era el mismo, a pesar de que el rozamiento con el aire iba acortando la amplitud de las oscilaciones. Galileo tardaría décadas en relacionar este episodio con los relojes. Según su discípulo Vincenzo Viviani, el chispazo de inspiración le sobrevino en el último año de su vida:

> Recuerdo que un día de 1641, mientras vivía con él en la villa de Arcetri, se le ocurrió la idea de adaptar el péndulo a un reloj con pesos o resortes [...]. Él esperaba que el movimiento natural y muy

regular del péndulo paliara cualquier defecto en el arte de los relojes. Sin embargo, como su ceguera le impedía llevar a cabo los dibujos y modelos necesarios, y como su hijo Vincenzo vino un día desde Florencia a Arcetri, Galileo le contó la idea y varias conversaciones siguieron.

Se desconoce el alcance exacto de estas discusiones. Según parece, Vincenzo Galilei intentó llevar a la práctica el proyecto de su padre. De ser el caso, no logró un mecanismo que funcionara de modo satisfactorio, puesto que no lo divulgó. El propio Huygens trató de zanjar el debate sobre la prioridad en la introducción de su *Horologium oscillatorium*: «A pesar de los rumores que cualquiera puede difundir, el desarrollo y construcción de estos [relojes] debe por entero su origen y perfeccionamiento a mis cuidadosas reflexiones».

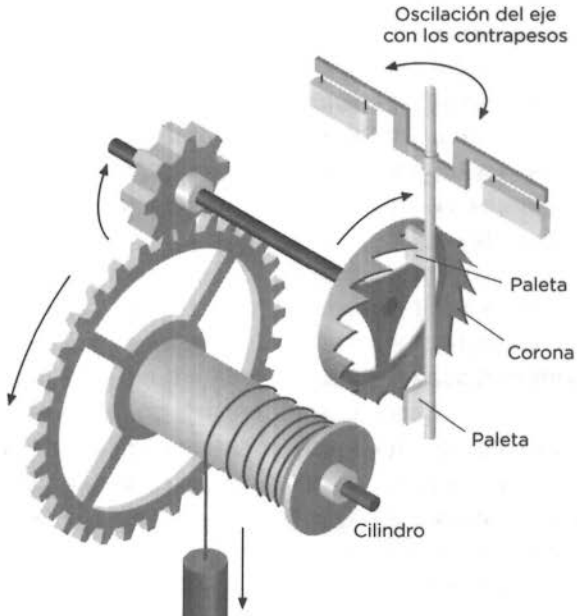
¿En qué consistía la invención en disputa? Vamos a comenzar con el diseño de un reloj extremadamente rudimentario. Consta de un tambor, al que enrollamos una cuerda atada a un peso. Se puede insertar una manecilla en el eje o en otro disco que se acople al cilindro mediante engranajes. Al soltar el peso, la gravedad tirará de él y pondrá el tambor en movimiento, haciendo girar la manecilla. La vida de este reloj resultará efímera, puesto que la rotación se detendrá en cuanto el peso alcance el suelo o la cuerda se desenrolle del todo.

Una primera mejora, por tanto, consiste en ralentizar la caída. Se puede recurrir a uno de los sistemas de freno más elementales: la fricción. Sin embargo, resulta difícil de ajustar de modo que el tambor complete una vuelta justo cada minuto, por ejemplo. Por otro lado, el propio rozamiento introduce un desgaste severo en el mecanismo que, de todos modos, tampoco operaría de manera uniforme, ya que es muy sensible a las condiciones atmosféricas, como la temperatura y la humedad.

A finales del siglo XIII los relojeros incorporaron un refinamiento técnico que permitía frenar la caída del peso y dotar a la rotación del tambor de un ritmo acompasado: el escape. Hay quien atribuye su invención a Villard de Honnecourt, un personaje envuelto en brumas de leyenda. La única fuente de información

acerca de su vida se reduce a un puñado de comentarios sueltos en treinta hojas de pergamino, que acompañan diseños de autómatas y máquinas de movimiento perpetuo. El escape primitivo se compone de una rueda dentada, la corona, y un eje con dos paletas, sobre el que se arma un bastidor horizontal o balancín del que cuelgan dos contrapesos (figura 1). Las paletas forman un ángulo de unos 90°, de modo que solo una de ellas entra en contacto cada vez con la corona. La corona y el eje giran en direcciones perpendiculares. Ambos elementos se comunican a base de golpes. El eje vertical va alternando su sentido de giro, a impulsos de los bofetones sucesivos que le propinan los dientes a las paletas, mientras el peso progresa siempre hacia abajo, arrastrando el cilindro. Cada impacto de un diente contra una paleta, a su vez, frena momentáneamente el giro de la corona y, por tanto, del cilindro.

FIG. 1



Los dientes de la corona presentan un canto recto y otro curvo. Los rectos son los que mantienen el vaivén del eje. Al golpear la paleta superior, lo impulsan en un sentido y al golpear la paleta inferior, en el contrario. El mismo impacto que aparta una paleta del camino de la corona, interpone la otra en el extremo opuesto. El papel de los contrapesos es frenar la inercia de estos giros, para que no se disipe demasiada energía en los impactos. El mecanismo de escape ejecuta dos trabajos a la vez: mantiene el eje en movimiento y frena con impulsos intermitentes la rotación del tambor. La gravedad —y la mano que vuelve a subir el peso cuando se desenrolla toda la cuerda— suministra toda la energía que precisa el reloj: tira del tambor, mueve la corona y las paletas, y atempera la oscilación del eje.

Este ingenioso mecanismo obra una discretización del tiempo, que viene dictada por la sucesión de impactos de las paletas. En otras palabras, proporciona un tictac rítmico al reloj. Sin embargo, no genera una regla temporal muy precisa, con divisiones equidistantes. Cualquier desgaste en los dientes —frecuente, a causa de los impactos— o el mínimo desequilibrio entre los contrapesos hace que la entrada y salida de las paletas al interferir en el giro de la rueda no se produzca a intervalos exactos y regulares. Cada golpe también provoca un retroceso algo azaroso en la corona, difícil de regular. El mejor reloj con este modelo de escape, llamado de rueda catalina y *foliot*, operaba con un error de 15 minutos al día.

EL MAESTRO RELOJERO

La pauta del reloj de Huygens no surge del diálogo imperfecto entre dos componentes de su mecanismo. La adquiere de un agente externo: el péndulo. Este ofrece, por su propia naturaleza física, un fenómeno periódico puro, que introduce una división nítida e igual del tiempo. El péndulo comunica la regularidad de su movimiento a las entradas y salidas de las paletas. Además, corrige sus asimetrías. Si, como pensaba Galileo, la amplitud de las oscilaciones no afecta al período, este no se verá afectado aunque

reciba de los dientes de la corona impactos de distinta intensidad, que tiendan a modificar la amplitud. El péndulo también permite un movimiento más suave que el vaivén de los contrapesos, lo que reduce el desgaste de los engranajes. Las orientaciones de la corona y el eje cambian, pero siguen girando en direcciones perpendiculares (figura 2).

Como en el modelo de escape anterior, el golpeteo de los dientes suministra al péndulo la energía que pierde en la fricción con el aire. Los relojes de péndulo dosifican la caída de un cuerpo bajo la acción de la gravedad a intervalos regulares. En un alarde de diseño, esa regulación también se alimenta de la propia gravedad. El principal problema que deben afrontar es que, en contra de lo que suponía Galileo, el período de oscilación de un péndulo sí depende de la amplitud (figura 3).

En otras palabras, el peso tarda más tiempo en completar una oscilación cuando el ángulo α es grande que cuando es pequeño. Es cierto que esta dependencia desaparece prácticamente para ángulos reducidos, pero el mecanismo de escape exigía oscilaciones holgadas para funcionar. Huygens asumió esta imposición práctica y se propuso construir un péndulo cuyo período no dependiera de la amplitud de las oscilaciones, ya fueran grandes o pequeñas.

En el péndulo, el compromiso entre el tirón vertical de la gravedad, que tiende a arrastrar el peso hasta el suelo, y la resistencia de la cuerda, que no le deja alejarse más

FIG. 2

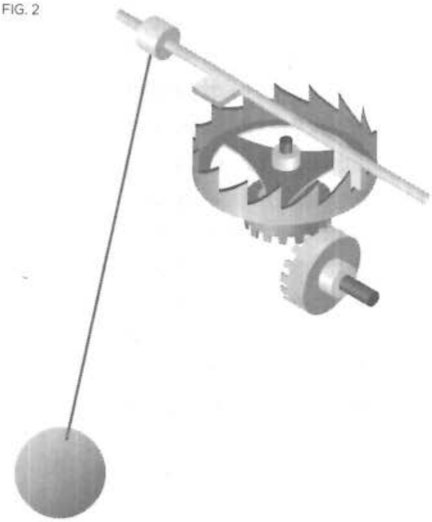
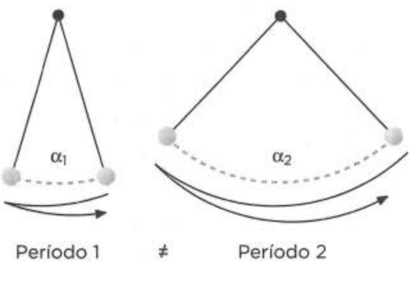


FIG. 3



allá de su longitud, le obliga a trazar un arco de circunferencia. Contamos por tanto con dos elementos: la gravedad y una restricción que imponemos a la trayectoria natural del peso. De ambos, el más sencillo de manipular es el segundo. Nos podemos olvidar por un momento de la cuerda, con la esperanza de que sabremos idear otro procedimiento que limite el movimiento del peso y lo obligue a oscilar en un camino que no sea circular. Se podría ensartar, por ejemplo, en un alambre bien engrasado o hacerlo rodar por una rampa curva. Por tanto, examinando la situación con absoluta libertad, ¿podemos imponer al peso una trayectoria cíclica, que recorra bajo el impulso de la gravedad, y que no dependa de la amplitud?

Desde un punto de vista físico, la pregunta se puede plantear de otro modo: ¿Existe alguna trayectoria a lo largo de la cual un cuerpo, al caer, tarde lo mismo en alcanzar su punto más bajo, independientemente de a qué altura inicie el descenso? La intuición parece señalar que no. En la ficción de *Moby Dick*, el protagonista, Ismael, tropieza con la respuesta por azar, mientras limpia por dentro una olla inmensa, donde se refina la grasa de ballena. Descubre que no importa desde qué altura se le caiga el jabón, siempre tarda lo mismo en resbalar hasta el fondo. ¿Qué patrón matemático seguía la curvatura de las ollas del *Pequod*? Doscientos años antes que Ismael, en diciembre de 1659, Huygens descubrió que se trataba de una cicloide invertida.

La cicloide era una de las curvas mejor conocidas por los matemáticos de la época. Llegó a ganarse el apelativo de «Helena de los geómetras» o «manzana de la discordia», por las polémicas que generó su estudio. Se cuenta que Pascal comenzó a pensar en ella para distraer un dolor de muelas. Como el recurso funcionó, lo interpretó como una señal divina de que debía profundizar en sus propiedades. Galileo surge, una vez más, en este punto de la historia, puesto que fue él quien le otorgó el nombre de «cicloide», después de admirar «su airosísima curvatura, adaptable a los arcos de un puente».

El método más sencillo para trazar una cicloide consiste en marcar un punto en una circunferencia y hacer que ruede sin deslizamiento. La trayectoria que sigue el punto dibuja la cicloide

ERRORES CIRCULARES

La figura 1 muestra un péndulo simple y en ella se señalan los principales responsables de su movimiento: el peso, P, debido a la gravedad, y la tensión de la cuerda, T. En un análisis clásico newtoniano, el peso se descompone en la suma de dos fuerzas, una perpendicular a la trayectoria ($P_p = P \cdot \cos\alpha$) y otra tangencial ($P_t = P \cdot \operatorname{sen}\alpha$). Esta división conduce a dos ecuaciones. En una de ellas, P_p se iguala a la tensión ($P_p = T$) en los dos extremos de la oscilación. Si P_p fuera mayor que T daría de sí la cuerda hasta romperla. Si fuera más débil, la cuerda tiraría de la masa m. Dado que L se mantiene constante, esta primera ecuación confina el movimiento del peso a un arco de circunferencia. La segunda ecuación describe su dinámica: cómo se acelera y se frena una vez instalado en el círculo, a lo largo de las oscilaciones: $m \cdot a_t = P_t = -P \cdot \operatorname{sen}\alpha$ (siendo a_t la aceleración tangencial). Se introduce un signo negativo porque cuando α es positivo (sen α, también positivo para $\alpha < 180°$) la fuerza apunta hacia la izquierda, sentido que consideramos negativo. Y a la inversa. Desarrollando un poco la expresión:

$$m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = -m \cdot g \cdot \operatorname{sen}\alpha,$$

donde s representa el espacio recorrido a lo largo de la circunferencia ($s = L \cdot \alpha$).

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -g \cdot \operatorname{sen}\alpha, \qquad \frac{d^2s}{dt^2} = -g \cdot \operatorname{sen}\frac{s}{L}.$$

La solución de esta ecuación es una función $s(t)$, que da para cada instante t la posición s de la masa: define su trayectoria. En general, no es una función periódica. Cuando α es muy pequeño (es decir, cuando L es mucho mayor que s) el seno y el ángulo se vuelven prácticamente iguales ($\alpha \approx \operatorname{sen}\alpha$) y la ecuación se simplifica:

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -g \cdot \frac{s}{L}.$$

La solución de esta ecuación sí que corresponde a una función periódica:

$$s(t) = s_{máx} \cdot \operatorname{sen}\left(\sqrt{\frac{g}{L}} \cdot t\right).$$

Cuanto mayor sea el ángulo α, más se apartará su valor del seno y peor será la aproximación periódica. Esta discrepancia se conoce con el nombre de *error*

circular. En la figura 2, la curva negra representa la función sen α y la recta gris, la función α. Se ve que coinciden solo para ángulos pequeños. A partir de unos 15°, aproximadamente, comienza la divergencia.

FIG. 1

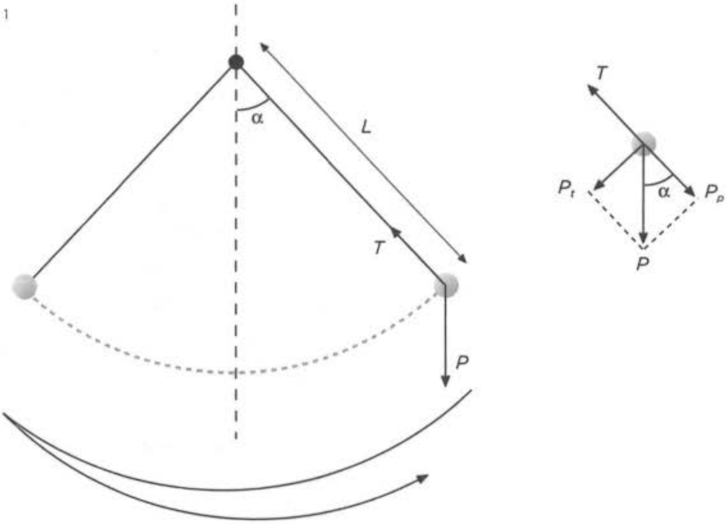


FIG. 2

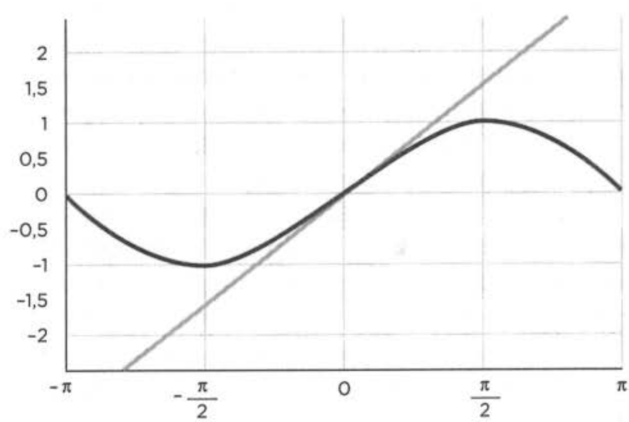


FIG. 4

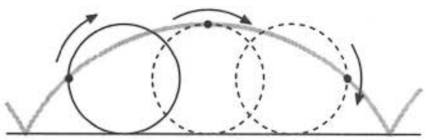
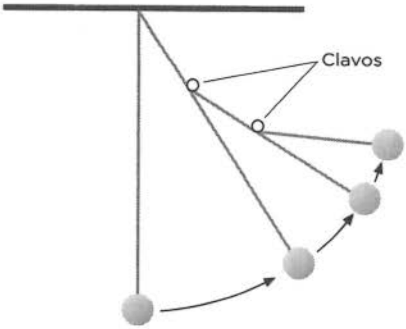


FIG. 5



(figura 4). La curva mantiene una relación muy especial con la gravedad. En 1696, Jacob Bernoulli planteó el siguiente desafío a la comunidad científica: si se unen dos puntos *A* y *B* mediante un alambre y en él se inserta una cuenta, ¿qué forma debe adoptar el alambre para que la cuenta tarde el menor tiempo posible en ir desde *A* hasta *B*? La respuesta, de nuevo, es una cicloide invertida.

El rasgo de la curva que interesaba a Huygens era su isocronía: da igual desde qué altura se suelte un cuerpo, si cae siguiendo una cicloide siempre tardará lo mismo en alcanzar el punto más bajo. Ahora bien, las caídas constituyen la mitad del movimiento pendular, porque una vez que el cuerpo alcanza el punto más bajo, el impulso que ha ganado le obliga a remontar. Si la restricción que condiciona el ascenso es simétrica respecto a la que limita la bajada (y despreciamos el rozamiento), subirá hasta alcanzar la misma altura desde la que cayó, y desde ella volverá a descender en sentido contrario. Tiempos de caída iguales para todas las alturas se traducen así en tiempos de ascenso iguales. El período es la suma de dos bajadas y dos subidas simétricas. Si todos los tiempos son independientes de las alturas, el período también será independiente de la amplitud.

Huygens había hallado la solución teórica a su problema: un péndulo ideal que oscilase siguiendo una cicloide. Ahora debía implementarla con los elementos que tenía a su disposición. Llevó el agua a su molino y transformó el problema físico en uno geométrico. Tenía que arreglárselas para componer una cicloide con una sucesión de trazos de compás, puesto que el péndulo describe arcos de circunferencia. Para lograr su objetivo jugó con el largo de la cuerda. Bastaba con interponer en su camino un clavo, que,

a partir de ese punto, produciría un movimiento pendular de longitud menor. Si disponía una serie de clavos, uno a continuación de otro y a diferentes alturas, cada uno obligaría al peso a trazar una circunferencia de radio más pequeño, que volvería a cortar el clavo siguiente, que a su vez impondría una circunferencia menor. Y así sucesivamente (figura 5).

Desde un punto de vista matemático, cualquier curva se puede trocear para, a continuación, aproximar cada uno de sus fragmentos mediante un brevísimo arco de circunferencia. Los trozos presentarán diversos grados de curvatura. Allí donde sea pequeña, hay que abrir mucho el compás para acomodar el trazo a la curva. Donde la curvatura sea pronunciada, por el contrario, hay que cerrarlo (figura 6).

Si uno lleva a cabo la operación sobre un folio, repasando el contorno de la curva a base de trazos de compás, descubre que durante el proceso va creando una serie de puntos: los agujeros que va dejando la punta del compás al hincarse en el papel. Al unir estos puntos se dibuja una segunda curva, relacionada con la primera, que se llama su «evoluta» (figura 7). Huygens obtuvo el sorprendente resultado de que la evoluta de una cicloide es otra cicloide (figura 8).

FIG. 6

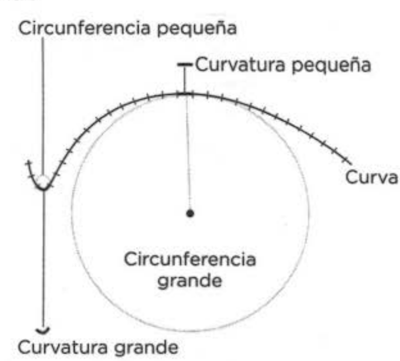


FIG. 7

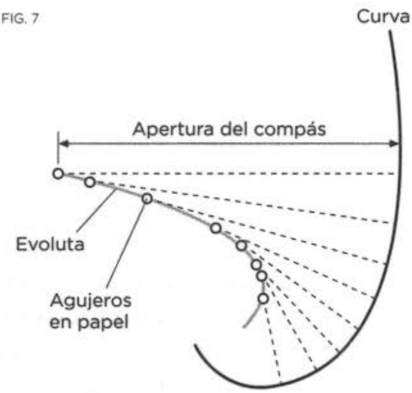
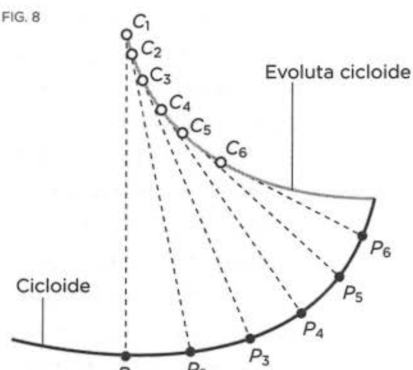


FIG. 8



Por tanto, si se cuelga un péndulo del punto C_1 y se fijan clavos en los puntos que van desde C_2 hasta C_6, la trayectoria circular natural del peso P se verá rectificada cinco veces, obligándole a ajustarse a una cicloide. La aproximación será mejor cuantos más clavos se sitúen a lo largo de la cicloide evoluta. En la práctica, en lugar de una hilera de clavos, Huygens utilizó dos chapas metálicas que combó siguiendo dos arcos de cicloide. De ese modo condicionaban la oscilación del péndulo, acortando y alargando la cuerda en función de la amplitud.

Huygens jugó matemáticamente con la naturaleza con el fin de forzar un verdadero movimiento periódico donde no lo había. Fue un hito en la historia de la ciencia. A su viejo maestro Van Schooten le hizo partícipe de su entusiasmo: «Sin duda se trata de mi mejor descubrimiento».

Podemos contemplar el funcionamiento del péndulo de Huygens bajo otra perspectiva. En un péndulo clásico, el peso, en su vaivén, traza arcos de circunferencia. Su período, a partir de un cierto ángulo, empieza a acusar la dependencia con la amplitud. Cuanto mayor se haga el ángulo, mayor será el período. Por otra parte, Galileo ya había señalado que la longitud de la cuerda afecta también al tiempo que el peso invierte en completar cada ciclo. Cuanto más larga sea la cuerda, mayor será el período. Aquí se manifiestan, por tanto, dos tendencias opuestas. Aumentar la amplitud alarga el período. Reducir la longitud de la cuerda lo disminuye. ¿Qué sucede si a medida que crece el ángulo se acorta la cuerda, de manera que ambos efectos sobre el período se contrarresten? Exactamente ese es el cometido de la chapa de cicloide.

En el grabado de la página 149 se muestra el diseño completo del reloj de Huygens, tomado de la primera parte del *Horologium*. El péndulo oscila con un período constante e independiente de la amplitud, que provee a la corona de un tictac uniforme. En su momento, el reloj de Huygens estableció un récord absoluto de precisión, con un error de menos de un minuto al día. Desde luego, su propuesta no señaló la única vía de progreso en la industria de los relojes. Alternativas más prosaicas pronto volvieron excesivo su alarde de ingenio. Entre 1670 y 1680 se desarrollaron el escape

de áncora y el de Graham, capaces de operar con las oscilaciones pequeñas de un péndulo normal.

En principio, el *Horologium oscillatorium* iba a limitarse a la descripción de un instrumento científico, pero se fue enriqueciendo y evolucionando a lo largo de los años, al más puro estilo Huygens, hasta convertirse en un compendio de tratados de diversas disciplinas. Igual que había hecho para perfeccionar el telescopio a través de la dióptrica, a la hora de diseñar su reloj se propuso comprender a fondo todos los fenómenos físicos implicados. El motor del reloj era la gravedad, así que Huygens emprendió un análisis completo sobre la caída de los cuerpos. Hizo lo propio con el movimiento circular, ya que en el corazón del mecanismo latía un péndulo.

«Lo leí con gran satisfacción, encontrándolo lleno de especulaciones muy ingeniosas y útiles, muy dignas de su autor.»

— Respuesta de Newton tras recibir un ejemplar del *Horologium*.

La quinta parte del *Horologium* se cierra con trece teoremas sin demostración sobre la fuerza centrífuga. De ellos se deduce que la aceleración que rectifica constantemente la tendencia de un cuerpo a seguir una línea recta y lo obliga a trazar una circunferencia, tirando de él hacia su centro, vale v^2/r (donde v es la velocidad del cuerpo, y r, el radio de la circunferencia). Newton llegó a la misma conclusión por otra vía, pero no publicó el resultado, así que por una vez fue Huygens quien se llevó el gato al agua.

El *Horologium* también contiene un pequeño tratado de geometría. Después de tropezar con el campo de las evolutas, la tentación de esbozar una teoría general era irresistible y, por supuesto, Huygens cayó en ella. Desarrolló métodos para definir la evoluta de una curva cualquiera, que aplicó a la parábola, la elipse y la hipérbola. También relacionó la cuadratura de curvas con sus evolutas.

La medición del tiempo se fue apoderando de la imaginación de Huygens, hasta erigirse en su segunda gran obsesión científica. El reloj de péndulo funcionaba admirablemente en los salones de

Luis XIV, pero para ayudar a un capitán de barco a determinar su posición después de una tempestad, su mecanismo debía resistir zarandeos y sacudidas constantes. No superaron la prueba. La mayoría acababa parándose o se estrellaban contra el suelo, por mucho que se anclaran a una viga del techo. La frustración ante la vulnerabilidad de los péndulos en las travesías marítimas impulsó a Huygens a replantear su estrategia. Sabiendo que un buen reloj necesita de un movimiento periódico que lo gobierne, ensayó un procedimiento distinto, donde el giro de la corona venía acompasado por la compresión y expansión de un resorte metálico enrollado en espiral. Este modelo ofrecía otro atractivo: permitía la fabricación de relojes de bolsillo, algo impensable hasta entonces. La euforia por el invento se vio empañada cuando su tentativa de patentarlo en Inglaterra lo expuso a las iras de Robert Hooke. Hooke exhibía una prolífica versatilidad, que en ocasiones provocaba pasmo y en otras encarnaba a la perfección el refrán de que quien mucho abarca poco aprieta. A menudo entreveía posibilidades que luego no acertaba a concretar, por falta de tiempo o porque su destreza matemática no estaba a la altura de su intuición física. Hooke proclamó a los cuatro vientos que él había descubierto el reloj de muelle dieciséis años atrás y que el resorte de Huygens «no valía un penique». Huygens se mostró escandalizado ante los términos de la reclamación y con fastidio se quejó de la «egocéntrica pretensión» de Hooke «de haberlo inventado todo».

LA TERRIBLE SIMETRÍA

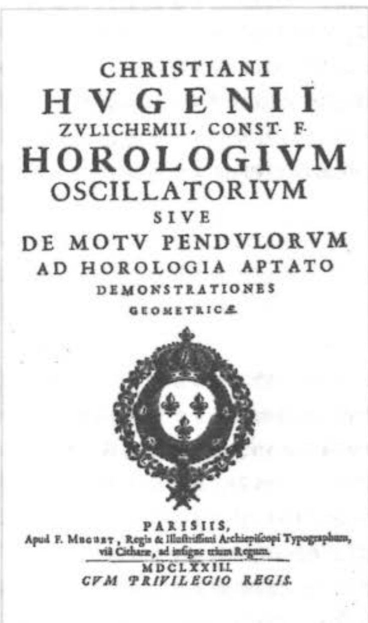
Para cerrar este repaso a la ciencia de Huygens vamos a retroceder cuatro décadas, a fin de examinar una de sus obras primerizas, en la que brilla con singular claridad la elegancia de su estilo. Contaba entonces con veintitrés años y ni el tiempo, ni el pulido de lentes, ni la luz habían captado todavía su atención. A pesar de su juventud, ya se había hecho notar como un alumno aventajado de Arquímedes, con su análisis de la estabilidad de los cuerpos en el agua y el virtuosismo matemático de sus cuadraturas.





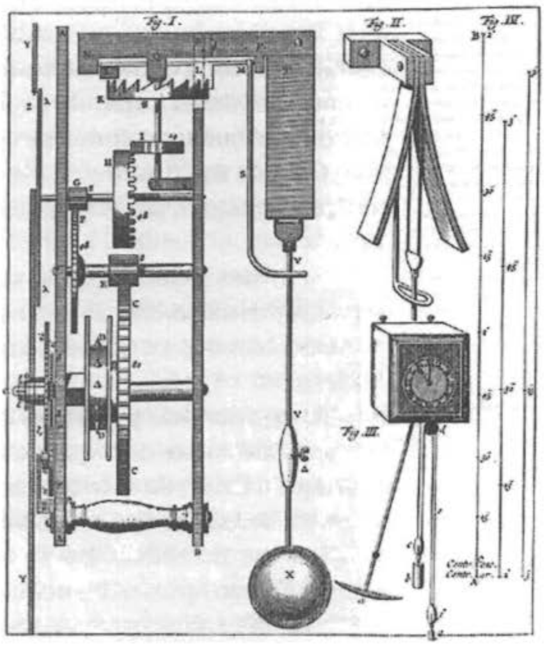
FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Huygens retratado por Caspar Netscher, durante su convalecencia en La Haya, en 1671.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Uno de los relojes fabricados por Huygens (Museo de la Ciencia, Londres).



CHRISTIANI
HVGENII
ZVLICHEMII, CONST. F.
HOROLOGIVM
OSCILLATORIVM
SIVE
DE MOTV PENDVLORVM
AD HOROLOGIA APTATO
DEMONSTRATIONES
GEOMETRICÆ.

PARISIIS,
Apud F. Muguet, Regis & Illustrissimi Archiepiscopi Typographum, via Citharæ, ad insigne trium Regum.
MDCLXXIII.
CVM PRIVILEGIO REGIS.



FOTOS INFERIORES:
Portada de *Horologium oscillatorium* y el grabado de la obra que muestra el diseño del reloj de Huygens.

Estrenando una actitud que pronto se convertiría en costumbre, el punto de partida fue una refutación a la ciencia de Descartes, en particular a sus leyes sobre la colisión elástica entre cuerpos. Su modo de proceder se ajustaría a las pautas habituales. Obtuvo los primeros resultados importantes en 1652, que no publicó, con vistas a completar un proyecto más ambicioso, que abandonaría y retomaría a lo largo de los años. Esbozó un tratado en 1656, que alcanzaría su forma definitiva en 1667 (*De motu corporum ex percussione*, «Sobre el movimiento de los cuerpos en colisión»). El texto vería la luz póstumamente. Huygens divulgó con cierta precipitación parte de sus resultados, sin demostraciones, en 1669, primero en el *Journal des Sçavans* y luego en las *Philosophical Transactions*, después de enterarse de que John Wallis y Christopher Wren habían publicado en enero un artículo sobre el mismo tema. Como en otras ocasiones, de tanto retener la mercancía, se le acabó enranciando.

Descartes había enunciado sus leyes sobre la colisión entre cuerpos en sus *Principia philosophiae* de 1644. Constituían una de las vigas maestras de su concepción mecanicista, dado que reducía las diversas interacciones físicas, como la gravedad, la luz o el magnetismo, a choques entre partículas de éter. Como autor de un magno sistema capaz de explicar el mundo, el filósofo francés tenía una idea muy definida de cómo debía comportarse la naturaleza. Cuando un experimento le llevaba la contraria, simplemente pasaba por alto la impertinencia:

> Las demostraciones de todo esto son tan ciertas que aun cuando la experiencia parezca demostrar lo contrario, sin embargo, estamos más obligados a dar crédito a nuestra razón que a nuestros sentidos.

Un espíritu más propio de los seguidores de Aristóteles, a los que combatía, que a lo que solemos entender por pensamiento cartesiano. Fruto de esta postura ensimismada, la naturaleza que presenta Descartes tiene algo de fantasioso, circunstancia que llevó a Leibniz a calificar los *Principia* de «una bonita novela de física». El libro prescribe ocho reglas para desentrañar el mecanismo de las colisiones que, ciertamente, terminan por describir

algunos fenómenos sorprendentes. Una de ellas establece que cuando un cuerpo choca contra otro mayor que él, que se halla en reposo, rebota con la misma velocidad que traía sin desplazar un solo centímetro al más grande. Este enunciado, de ser cierto, impediría que los niños tirasen al suelo a los adultos cuando, en plena carrera, tropiezan con ellos.

Podemos imaginar a Huygens alzando una ceja mientras leía los *Principia*. En enero de 1652 expresó sus dudas a un científico de Lovaina, Gerard van Gutschoven. Aguardó nueve meses más, hasta estar bien seguro, antes de confiar sus inquietudes a su mentor, Van Schooten, acérrimo cartesiano. El profesor de la Universidad de Leiden le recomendó que no perdiera el tiempo ahondando en semejantes herejías. Huygens se mantuvo en sus trece:

> Si todas las reglas de Descartes, excepto la primera, no son erróneas, entonces, obviamente, ya no soy capaz de señalar la diferencia entre lo que es correcto y lo que es falso.

Pero Huygens, desde luego, era muy capaz de realizar esa distinción. En lugar de prestar oído a Van Schooten, se atuvo al consejo de su primer maestro, Jan Stampioen, y trató de llegar a sus propias conclusiones, sin dejarse condicionar por las ajenas. Su manera de abordar el problema combina modos antiguos y modernos. Antiguos porque se vale de una física que todavía no había sido remozada por Newton, y modernos porque en gran medida su argumentación gira en torno a la simetría, una actitud muy del gusto físico contemporáneo. Huygens basó su análisis en un principio que Galileo había descrito en sus célebres Discorsi de 1638. El científico italiano había observado que una persona instalada en la bodega de un barco sin escotillas es incapaz de decidir, mediante un experimento mecánico, si está en reposo o se mueve con velocidad constante. Es decir, mientras la nave no acelere, su desplazamiento no afecta a la dinámica de los elementos que se encuentran en su interior. En su estudio de las colisiones, Huygens cambia constantemente de perspectiva, pero como todas ellas se relacionan entre sí mediante velocidades constantes, la esencia de la interacción que está examinando no sufre ninguna

alteración. Su instinto físico le llevó a percibir que lo que de verdad importa en un choque es la velocidad relativa entre los cuerpos: aquella con la que cada uno advierte que se aproxima el otro, algo que no cambia bajo ningún punto de vista.

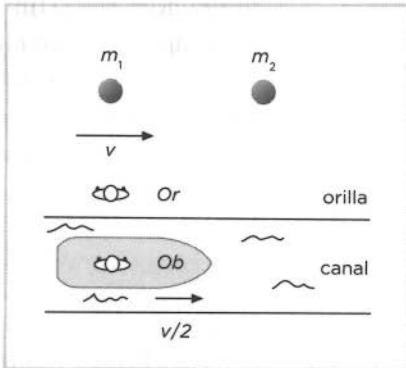
Las colisiones que consideró eran elásticas, lo que quiere decir que el impacto no roba energía al movimiento de los cuerpos. Estos rebotan y no se adhieren ni se incrustan. Huygens partió de la única regla de Descartes que salvó de la quema: si dos masas iguales chocan con la misma velocidad, rebotan invirtiendo sus velocidades. La fuerte simetría de la situación ofrece un desenlace intuitivo. Llamaremos a las masas de los cuerpos m_1 y m_2 y asumiremos como positivas las velocidades dirigidas hacia la derecha (→) y como negativas, las de sentido contrario (←). Al invertir su velocidad, m_1 pasa de v a $-v$ y m_2 pasa de $-v$ a v.

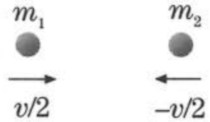
A partir de aquí, Huygens buscó la simetría de esta colisión elemental en todas las demás. Ahora bien, para revelarla, había que adoptar el punto de vista adecuado. Es como cambiar de butaca al asistir a un espectáculo. Se pretende adquirir un ángulo más favorable que permita apreciar una simetría que pasa desapercibida para el resto de espectadores, pero esa posición privilegiada no altera la naturaleza de la representación. Todos los cambios de punto de vista que maneja Huygens entrañan velocidades constantes.

Lo podemos ver mediante un par de ejemplos. Situemos, por ejemplo, el segundo cuerpo m_2 en reposo, mientras la masa m_1 se dirige a su encuentro con una velocidad v. ¿Cuál será el resultado de esta colisión? ¿La masa m_1 invertirá su velocidad y rebotará con $-v$? ¿Se detendrá y comunicará toda su velocidad a m_2? ¿Solo le cederá una parte de su impulso y las dos avanzarán hacia la derecha con distintas velocidades?

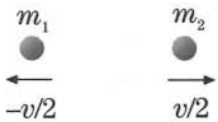
De entrada se ha perdido la simetría del caso anterior, lo que limita la intuición sobre lo que va a suceder. Huygens contempla entonces el impacto a bordo de un vehículo que se desplaza hacia la derecha con velocidad $v/2$. Para aclarar la situación, recurre a dos observadores, uno en reposo (*Or*), que ubica en la orilla de un canal, y otro subido en una barca (*Ob*) que navega en el sentido de m_1 con velocidad constante $v/2$.

Ob se mueve con la barca, así que para él la masa m_2 ya no permanece quieta: sale a su encuentro con velocidad $v/2$. Por otro lado, como *Ob* se mueve en el mismo sentido que m_1, verá a esta masa moverse más despacio. Es el mismo efecto que se aprecia al viajar en coche. Los postes de la luz, en reposo, vienen hacia nosotros con la velocidad que lleva el vehículo y los coches que comparten la carretera en nuestro sentido parecen correr más despacio que si los contempláramos desde el arcén. Por tanto, *Ob* asiste a la siguiente colisión:





Con esta perspectiva, nuestra intuición ya sabe resolver el choque: se invierten las velocidades de cada masa.



Desde el punto de vista privilegiado de *Ob* se aprecia la simetría. Para saber qué es lo que observaría *Or* hay que despojar a cada masa de la parte del movimiento debida al desplazamiento de la barca. Recuperando el símil del coche, al detenernos en el arcén, los vehículos que circulaban en nuestro mismo sentido ganarán la velocidad que llevábamos y los que corrían en sentido contrario la perderán. Por tanto, m_2 y m_1 ganarán y perderán $v/2$, respectivamente. Es decir, después de que se haya producido la colisión, *Or* verá cómo m_1 queda en reposo y cómo m_2 se aleja hacia la derecha con velocidad v.

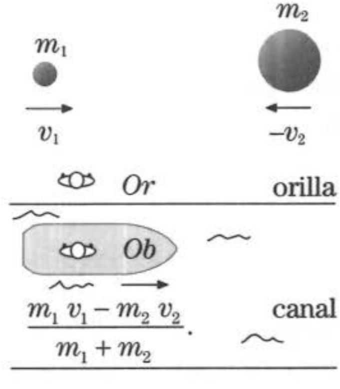
La estrategia que se ha aplicado en este caso particular resuelve con facilidad cualquier choque entre dos cuerpos de masas

iguales que se muevan con distintas velocidades. ¿Qué ocurre cuando las masas también son diferentes? Esta nueva condición parece romper definitivamente la simetría, pero Huygens logró restablecerla. Existe una velocidad para la barca que traslada a un punto de vista exclusivo donde cada cuerpo invierte su velocidad después del impacto. Es:

$$\frac{m_1\, v_1 - m_2\, v_2}{m_1 + m_2}.$$

En el numerador de la expresión se multiplican velocidades por masas, dando lugar a una magnitud física que recibe el nombre de «momento» (el momento, p, de un cuerpo de masa m es: $p = m \cdot v$). Al volver a dividir por una masa se obtiene una velocidad.

Tomemos la situación:



Ahora las masas son distintas: m_2 es mayor que m_1. Para definir mejor la colisión, asumiremos que v_1 es mayor que v_2 (o mejor todavía: $m_1 \cdot v_1 > m_2 \cdot v_2$). Si asistimos al choque desde una barca que se desplaza hacia la derecha con una velocidad constante:

$$\frac{m_1\, v_1 - m_2\, v_2}{m_1 + m_2},$$

esto es lo que observaremos:



$$\frac{m_2}{m_1+m_2}(v_1+v_2) \qquad -\frac{m_1}{m_1+m_2}(v_1+v_2)$$

Como m_2 es mayor que m_1, para un espectador montado en la barca la masa pequeña correrá más deprisa que la grande. Desde su atalaya simétrica, *Ob* advertirá que m_1 invierte su velocidad después del impacto, igual que m_2:



$$-\frac{m_2}{m_1+m_2}(v_1+v_2) \qquad \frac{m_1}{m_1+m_2}(v_1+v_2)$$

Para averiguar qué escena contempla *Or*, plantado en la orilla, hay que sumar

$$\frac{m_1\,v_1-m_2\,v_2}{m_1+m_2}$$

a la masa que se desplaza en el sentido de la barca, m_2, y sustraer la misma velocidad a la masa que corre en sentido contrario, m_1. Así se obtiene un resultado que dista mucho de ser intuitivo:



$$-\frac{(m_2-m_1)v_1+2m_2v_2}{m_1+m_2} \qquad \frac{2m_1v_1+(m_1-m_2)v_2}{m_1+m_2}$$

Al ojo atento de Huygens no se le escaparon dos nuevas simetrías. Aunque en el proceso de choque se modifiquen las velo-

cidades de los cuerpos, existen otras magnitudes que permanecen inalterables. La más evidente es la masa. Menos obvia resulta la suma del producto de cada masa por su velocidad (el momento), antes y después del impacto. Es decir:

$$m_1 \cdot v_{1\ \text{antes}} + m_2 \cdot v_{2\ \text{antes}} = m_1 \cdot v_{1\ \text{después}} + m_2 \cdot v_{2\ \text{después}}$$

$$p_{1\ \text{antes}} + p_{2\ \text{antes}} = p_{1\ \text{después}} + p_{2\ \text{después}}$$

EL DEMONIO ESTÁ EN LOS DETALLES

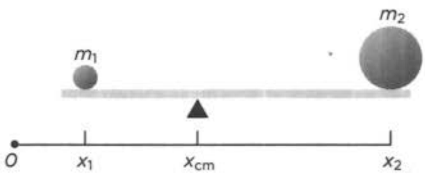
La expresión, en apariencia algo arbitraria, de la velocidad de la barca corresponde al llamado «centro de masas». Se trata de una entidad abstracta, útil para investigar el comportamiento de numerosos sistemas físicos. Para dos cuerpos como m_1 y m_2, situados en x_1 y x_2, se ubica en un punto que descansa en la línea que los une. Su posición x_{cm} viene dada por:

$$x_{cm} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2}.$$

El centro de masas señala un punto de equilibrio. En él se podría apoyar un tablón que contrabalancearía los dos cuerpos (véase la figura). Si las masas se mueven, en general también lo hará el punto x_{cm}. Su velocidad vendrá dada por:

$$v_{cm} = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}.$$

Cambiando el signo a v_2 para reflejar que esta masa se desplaza hacia la izquierda, se obtiene la expresión para la velocidad de la barca que, por tanto, se sitúa en el centro de masas. Este es el punto privilegiado desde el que se aprecia la simetría del impacto. Teniendo en cuenta la conservación del mo-



Esta simetría se puede asumir en otros contextos físicos, al margen de las colisiones. Hasta tal punto cabe generalizarla que constituye uno de los pilares de la física: el principio de conservación del momento. Huygens también reparó en la constancia de otra cantidad, la suma del producto de cada masa por el cuadrado de su velocidad, antes y después de la colisión:

$$m_1 \cdot v_{1\ \text{antes}}^2 + m_2 \cdot v_{2\ \text{antes}}^2 = m_1 \cdot v_{1\ \text{después}}^2 + m_2 \cdot v_{2\ \text{después}}^2$$

mento, se deduce que en la colisión no varía la velocidad del centro de masas. Podemos ver con un poco más de detalle cómo cambian las velocidades para los observadores de la barca y de la orilla. Definimos las variables v_{1ba} (velocidad de la masa m_1 tal como se percibe desde la barca antes del choque), v_{2ba} (velocidad de la masa m_2 desde la barca antes del choque), v_{1oa} (velocidad de la masa m_1 tal como se percibe desde la orilla antes del choque), v_{2oa} (velocidad de la masa m_2 desde la orilla antes del choque) y v_b (velocidad de la barca). Desde *Ob*, antes del impacto, las velocidades de los cuerpos son:

$$v_{1ba} = v_{1oa} - v_b = v_1 - \left(\frac{m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}\right) = \frac{m_2 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2},$$

$$v_{2ba} = v_{2oa} - v_b = -v_2 - \left(\frac{m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}\right) = -\frac{m_1 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2}.$$

A partir de estas expresiones se deduce una de las claves de la simetría en el centro de masas: en él ambos cuerpos muestran el mismo momento ($m_1 \cdot v_{1ba} = m_2 \cdot v_{2ba}$). Después del impacto se invierten las velocidades, luego:

$$v_{1bd} = -\frac{m_2 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2}, \qquad v_{2bd} = \frac{m_1 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2},$$

donde el subíndice *d* sustituye ahora al *a*, para indicar que estas son las velocidades después del choque. Para resolver las velocidades desde la orilla, basta con deshacer el primer cambio:

$$v_{1od} = v_{1bd} + v_b = -\frac{m_2 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2} + \left(\frac{m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}\right) = -\frac{(m_2 - m_1) \cdot v_1 + 2 \cdot m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2},$$

$$v_{2od} = v_{2bd} + v_b = \frac{m_1 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2} + \left(\frac{m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}\right) = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1 + (m_1 - m_2) \cdot v_2}{m_1 + m_2}.$$

donde no cuesta reconocer una manifestación del principio de conservación de la energía, en este caso, de la energía cinética.

Hay que recalcar que Huygens se desenvolvió en un marco conceptual prenewtoniano. No empleó en ningún momento la noción de fuerza, ni habló, por tanto, de fuerzas de acción y reacción para justificar los cambios de velocidad que experimentan los cuerpos. Hoy en día las colisiones elásticas se resuelven a un nivel de física elemental, casi sin pensar, asumiendo como axiomas los principios de conservación, que proporcionan dos ecuaciones con dos incógnitas (las velocidades finales). Huygens procedió a la inversa. En el siglo XVII las leyes de conservación no estaban claramente establecidas, aunque se hallaban ya en proceso de maduración. En cierto sentido Huygens convirtió un problema dinámico en estático. Los cuerpos que chocan desde luego se mueven, pero los contempló desde una perspectiva tan simétrica y predecible como si nunca salieran de una situación de equilibrio.

El análisis de las colisiones de Huygens se puede considerar revolucionario, ya que marca el nacimiento de la física matemática. A la hora de imaginar a un físico en plena faena, ya sea Albert Einstein o Sheldon Cooper, a uno le viene de inmediato a la mente una pizarra llena de ecuaciones. No siempre fue así. Galileo había expresado verbalmente las leyes sobre la caída de los cuerpos, apoyándose en figuras geométricas, como había hecho antes que él Arquímedes y cuantos le precedieron en el estudio de la naturaleza. Hasta Girolamo Cardano resolvió la ecuación cúbica con buena prosa y visualizando cada término como un cubo tridimensional, que se podía plasmar en un dibujo. A partir de la obra de François Viète, el álgebra cuajó como un lenguaje flexible y conciso, que operaba con más potencia que las palabras en el ámbito matemático. Casi acto seguido, Descartes tendió un puente entre las imágenes de la geometría y las ecuaciones. El aspecto de los libros de mecánica o astronomía sufrió entonces una metamorfosis radical. De una colección de párrafos apretados, que solo se interrumpían para dejar espacio a una serie de láminas plagadas de rectas, parábolas y círculos, las páginas se llenaron de expresiones algebraicas, de líneas sueltas, como versos, donde se intercalaban las letras y los símbolos de las operaciones. Este punto

de inflexión en la representación y en el modo de pensar y de manipular matemáticamente los conceptos físicos se produce con Huygens. Casi con seguridad, las grandes hojas en las que apuntó sus cálculos sobre colisiones, en 1652, registran la primera vez que alguien escribió ecuaciones donde las variables encarnaban velocidades y masas, en suma, entidades físicas. Por supuesto, la transición aconteció de forma gradual. El propio Huygens, como Newton, prefirió la mayoría de las veces la manera tradicional de Arquímedes.

Los cambios de perspectiva que animan *De motu corporum ex percussione* desprenden un fuerte aroma relativista. Un detalle que Einstein no pasó por alto. En la relatividad especial los puntos de vista reciben el nombre de «sistemas de referencia». Aquellos que permanecen en reposo o se desplazan con velocidad constante respecto a otros se llaman «inerciales». En 1954, Einstein escribía a su amigo, el ingeniero suizo Michele Besso:

> La teoría de la relatividad especial en el fondo no hace más que adaptar la noción de sistema inercial a la firme certidumbre, dictada por la experiencia, de la constancia de la velocidad de la luz, para cualquier sistema inercial. No puede prescindir del concepto de sistema inercial, que es insostenible desde un punto de vista epistemológico ([Ernst] Mach puso de manifiesto la inconsistencia del concepto con claridad, aunque ya había sido entrevista por Huygens y Leibniz).

Lecturas recomendadas

ANDRIESSE, C.D., *Huygens: The Man Behind the Principle*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

AUSEJO, E., *Las matemáticas en el siglo XVII*, Madrid, Akal, 1992.

BASULTO SANTOS, J. Y CAMÚÑEZ RUIZ, J.A., *La geometría del azar. La correspondencia entre Pierre de Fermat y Blaise Pascal*, Tres Cantos (Madrid), Nivola, 2007.

DIJKSTERHUIS, F.J., *Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century*, Nueva York, Springer-Verlag, 2004.

FERRIS, T., *La aventura del universo*, Barcelona, Crítica, 2007.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HOLTON, G., *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Barcelona, Reverté, 2004.

KRAGH, H., *Historia de la cosmología*, Barcelona, Crítica, 2008.

PLA, C., *Huygens-Fresnel. La teoría ondulatoria de la luz*, Buenos Aires, Losada, 1945.

SERWAY, R.A., Y JEWETT, J.W., *Física II*, México, Thomson, 2003.

SOLÍS, C. Y SELLÉS, M., *Historia de la ciencia*, Madrid, Espasa, 2005.

Índice